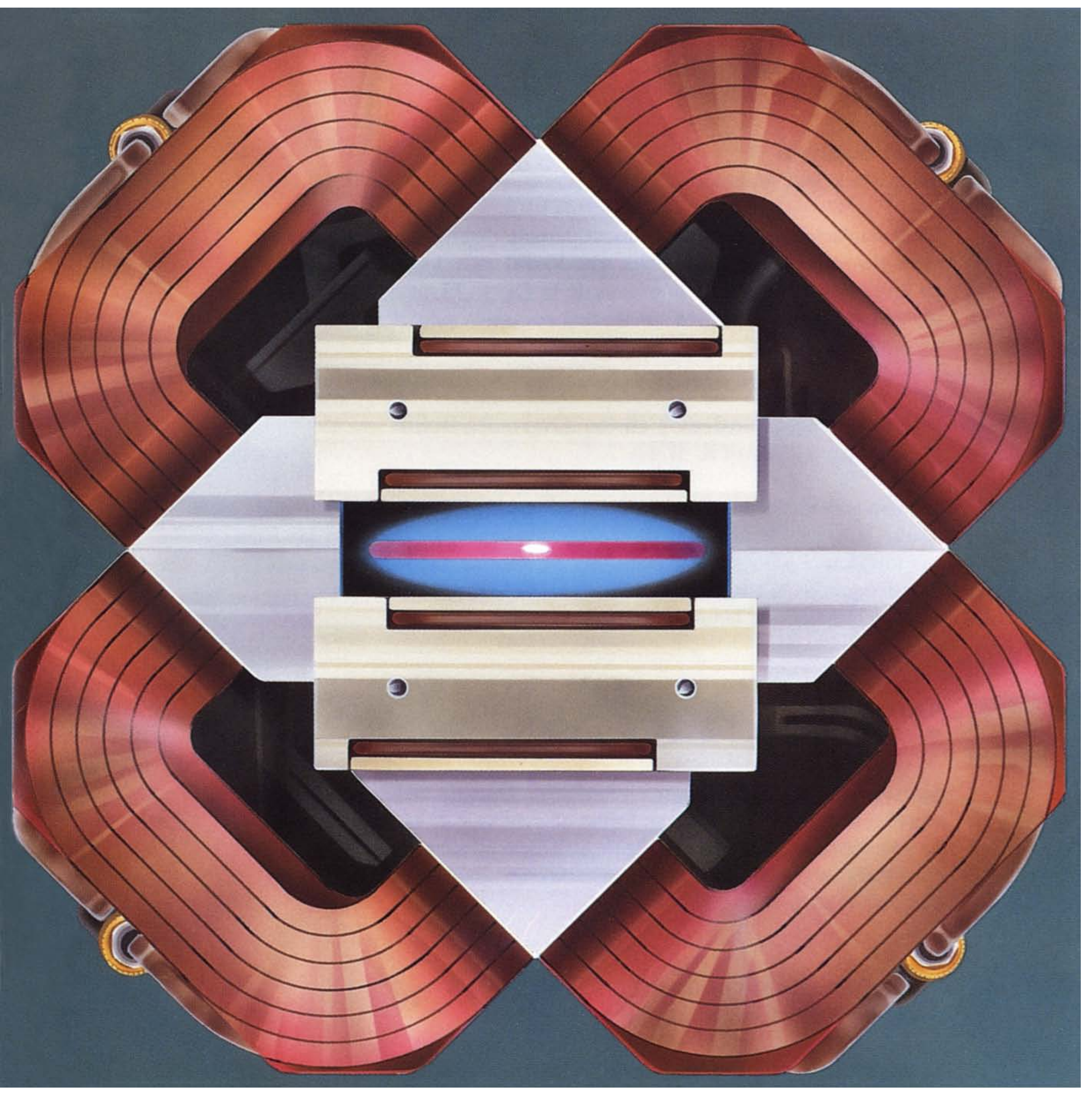
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



LASERES DE ELECTRONES LIBRES

Junio 1989

500 PTAS.



Junio de 1989 Número 153

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *Cambio climático global*; Amando García Rodríguez: *Interferencias cuánticas y efecto Aharonov-Bohm*; Ana María García García: *Astrocitos*; Ramón Pascual: *Láseres de electrones libres*; Joandomènec Ros: *Función sensorial de la foca común*; Laureano Carbonell: *El trirreme navega de nuevo*; José Manuel García de la Mora: *Los niños de la isla Jardín*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

G. Velarde, J. M. Aragonés, J. M. Martínez-Val y G. M. Perlado; Cecilio Barroso y Francisca Medina; Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

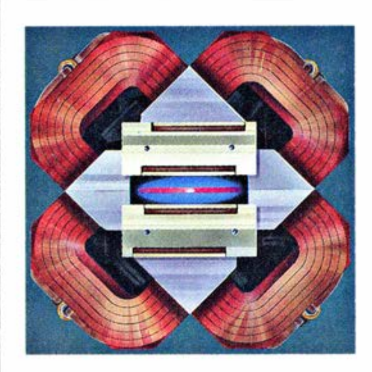
Manuel Puigcerver

Libros:

Jaume Terradas, Luis Alonso, Domingo Fletcher y Lluís Cornudella.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
9	Fred Hirschmann
10-13	Thomas C. Moore
14	Markus Aellen, Instituto Politécnico de Suiza
15-16	Thomas C. Moore
19	Chris M. Hall y Derek York, Laboratorio de Geocronometría de la Universidad de Toronto
20-22	Margarita López y R. Génova
23	Tullia C. Onstott, Universidad de Princeton Jersey
24	C. M. Hall (*arriba*); Margarita López y R. Génova (*abajo*)
29	Akira Tonomura, Hitachi Ltd., Tokio
30	Akira Tonomura (*izquierda*), Gabor Kiss (*derecha*)
31-33	Gabor Kiss
34	Richard A. Webb
45	Andreas Karschin, Heinz Wässle y Jutta Schnitzer, Instituto de Investigación Cerebral Max Planck, Frankfurt
46-47	Seward Hung
48	Lowell W. Lapham, Hospital Clínico de la Universidad de Rochester
49	Michael D. Norenberg (*arriba*), Seward Hung (*abajo*)
50	Dennis M. D. Landis, Instituto Nacional de Alteraciones Neurológicas, Comunicación y Ataques
51-54	Seward Hung
57	Yves Petroff y Jean-Michel Ortega LURE Universidad de París
58-60	Ian Worpole
61	Jon Brenneis
65	Deane Renouf
66-69	Patricia J. Wynne
70-71	Paul Lipke
72-73	George Retseck
74	Piergiorgio Sclarandis, Black Star
75-76	George Retseck
77-78	Piergiorgio Sclarandis, Black Star
81	Mike Teruya/Free Spirit Photography
82-84	Bob Conrad
85	John Wehrheim y Sociedad de Historia de Kauai
89	Edward Bell
90	Andrew Christie
92-96	Michael Goodman



LA FIGURA de la portada representa el centro de un láser de electrones libres del que se ve salir tanto luz láser como un haz de electrones (véase "Láseres de electrones libres", por Henry P. Freund y Robert K. Parker, en este número). Los electroimanes contenidos en las zonas rectangulares, encima y debajo de la cavidad del haz, provocan que los electrones se muevan de un lado a otro. El haz desviado interacciona con el campo magnético de la onda luminosa incidente, frenando los electrones y amplificando la luz de forma coherente.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpetua de la Moguda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...cien años

Antonio Machado Alvarez, principal iniciador de las investigaciones sobre el folklore en España, publicó la traducción castellana del libro *Folk-Medicine*, de William George Black, generalmente considerado como punto de partida de los estudios modernos acerca de la medicina popular. El correspondiente volumen no incluye solamente la versión de esta obra, con un prefacio de su autor "para la edición española", sino también textos del propio Machado y del gran cirujano Federico Rubio relativos a la medicina popular española, así como la reimpresión de un artículo de Eugenio Olavarría Olarte, primero dedicado al tema aparecido en una revista etnográfica extranjera.

Antonio Machado Alvarez (1846-1893) perteneció a una familia de gran relieve en la cultura española. Fue hijo del médico y naturalista gaditano Antonio Machado Núñez, catedrático en las universidades de Sevilla y Madrid y uno de los más tempranos seguidores españoles del darwinismo, y padre de los poetas Antonio y Manuel Machado Ruiz. Estudió en Sevilla letras y derecho y, tras ejercer durante algún tiempo la abogacía, fue juez y profesor en la Facultad de Derecho de Sevilla. En los años finales de su vida residió en Madrid, donde se dedicó al periodismo, siendo director del diario *La Justicia*, fundado por Nicolás Salmerón. Lo mismo que su padre, tuvo una ideología liberal progresista y recibió la influencia del ambiente krausista sevillano encabezado por Federico de Castro, discípulo de Julián Sanz del Río. También estuvo relacionado con Francisco Giner de los Ríos y la Institución Libre de Enseñanza. Como hemos adelantado, fue el principal introductor en España de los estudios sobre el folklore. A la difusión inicial de este término contribuyó de forma decisiva William George Black con la fundación en 1878 de "The Folk-Lore Society", de cuya junta directiva fue miembro Machado. De acuerdo con este modelo, Machado fundó tres años más tarde la "Sociedad del Folk-Lore Andaluz", que editó en Sevilla la revista mensual *El Folk-Lore Andaluz* (1882-1883), continuada en cierto modo por los once volúmenes de la *Biblioteca de Tradiciones Populares Españolas* que el gran folklorista publicó en Madrid desde 1883 hasta 1886. Muchos de sus numerosos trabajos personales, especialmente los relativos a la literatura popular andaluza, fueron traducidos a los principales idiomas europeos. A su vez, Machado tradujo al castellano, aparte de la obra de Black y de textos de menor importancia, otro libro fundamental: la *Anthropology*, de Edward B. Tylor.

Del gaditano Federico Rubio Galí (1827-1902) ya nos hemos ocupado en esta sección como figura central de la revolución quirúrgica en España y como fundador de instituciones médicas renovadoras como la Escuela Libre de Medicina y Cirugía, de Sevilla, y el Instituto de Terapéutica Operatoria, de Madrid. Conviene ahora solamente recordar que, junto a sus destacadas contribuciones a la técnica quirúrgica y su atención a la histopatología y la microbiología, demostró gran interés por las cuestiones sociomédicas. De ideología progresista afín a la de Machado e influido como éste por el ambiente krausista sevillano, fue uno de los primeros médicos españoles que se interesó seriamente por la patología social, a la que dedicó su discurso *La Sociopatología* (1890) y el libro titulado *La Felicidad. Primeros ensayos de patología y de terapéutica social* (1894). Por otra parte, fue presidente de la sección de medicina de la asociación "El Folk-Lore Castellano", cargo con el que firmó un apéndice a la traducción de la

MEDICINA POPULAR

UN CAPITULO EN LA HISTORIA DE LA CULTURA

POR

WILLIAM GEORGE BLACK

F. S. A. Scot.

traducida del inglés por

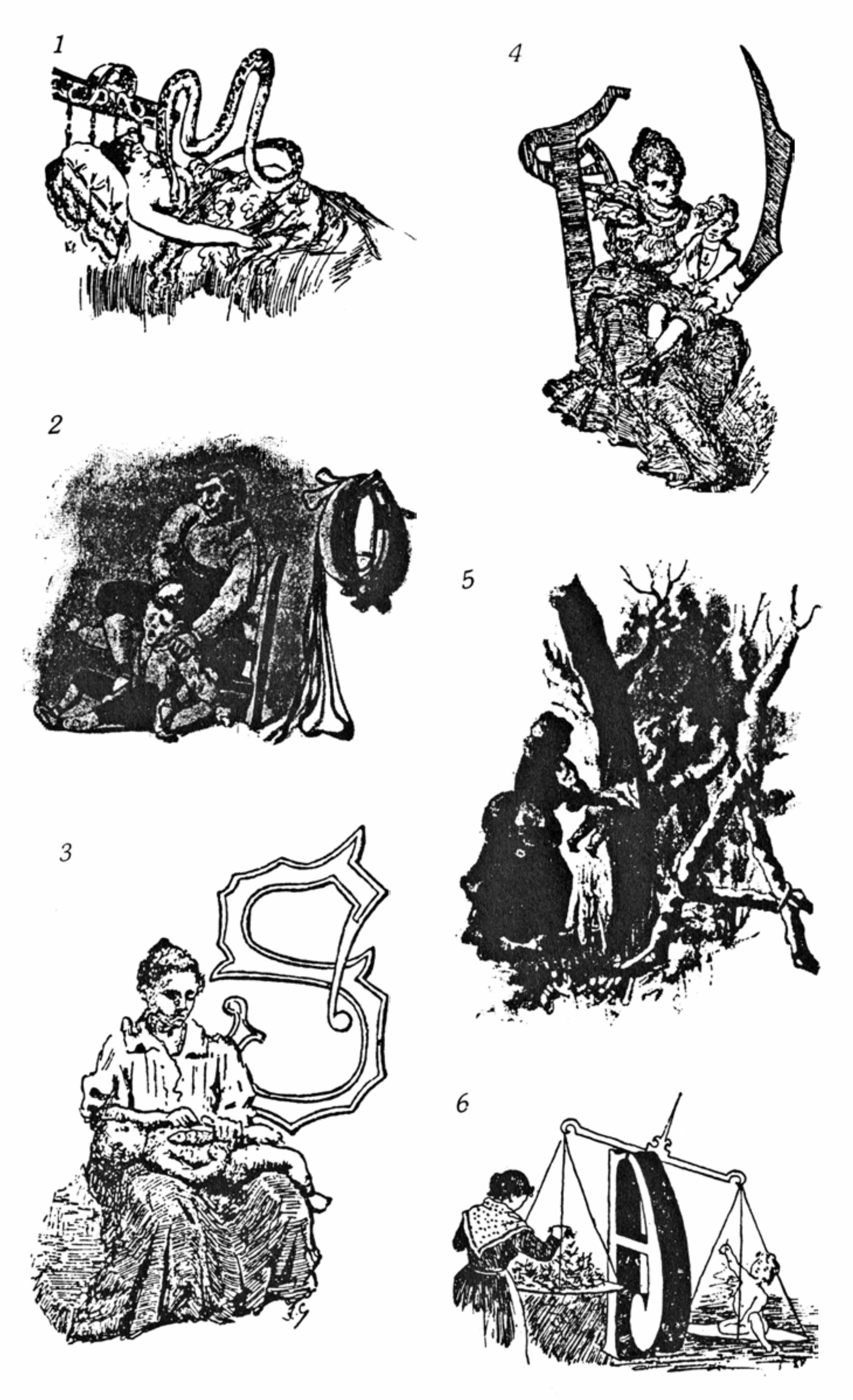
ANTONIO MACHADO Y ÁLVAREZ

Doctor en Filosofía y Letras
é Individuo de la Junta Directiva de la Folk-Lore Society.



MADRID
EL PROGRESO EDITORIAL
1889

1. Portada de la traducción castellana por Antonio Machado Alvarez de Folk-Medicine *de William George Black.*



2. Seis aspectos de la folkmedicina española, tema al que están dedicados los trabajos de Federico Rubio, Eugenio Olavarría y Antonio Machado que complementan la traducción castellana del libro de Black:

1. *Creencia en serpientes que, durante la noche, succionan la leche de madres lactantes dormidas, mientras meten la punta de su cola en la boca de los niños para que éstos no lloren.* 2. *Procedimiento para elevar la "campanilla caída" en las amigdalitis, tirando de un mechón de pelos de la parte más alta de la cabeza del enfermo.* 3. *Tratamiento de los "retortijones de tripas", colocando un pescado vivo sobre el ombligo.* 4. *Tratamiento del hipo con una bolita arrancada a un tejido de lana y pegada con saliva en la frente.* 5. *Curación de los niños "quebrados" (con hernia), pasándolos a través de la hendidura de un árbol durante la noche de San Juan.* 6. *Curación del "mal de ojo", dejando secar una cantidad de torvisco igual al peso del niño "fascinado".*

Los grabados proceden de las letras capitulares del libro de Enrique Salcedo Ginestal, Madre e hijo *(1898)*

obra de Black en forma de tres "cartas sobre medicina popular" dirigidas a Machado y dedicadas a exponer materiales españoles y algunas cuestiones teóricas. La más notable de estas últimas es la relación entre la medicina popular y la académica, que Rubio sintetizó de la siguiente forma:

"Considero interesante y útil, además de curioso, investigar y discurrir sobre si la medicina científica procede de la vulgar o la vulgar de la científica.

"En esto entiendo que hay comunicación, compenetración y circulación entre los conocimientos médicos de una y otra clase.

"Ciertas drogas pasan desde el vulgo a los códices terapéuticos, y otras de los códices terapéuticos pasan al vulgo.

"Lo dicho es la pura verdad, y esos hechos de transmisión se ven ocurrir patentemente en nuestros mismos días. Por si alguno lo duda, entre mil, citaré dos ejemplos.

"Después de empuñar la piqueta Broussais y destruir el edificio de la medicina antigua quedó todo el cuerpo científico de la medicina reducido a la gastritis como patología y a las sangrías y la dieta de sustancia de pan, como terapéutica.

"La reforma no podía ser más radical ni más sabia ni, sin embargo, más absurda ni de menos sentido común.

"Con ella sucedió lo que tenía que suceder, a tal nihilismo respondió una reacción no menos científica tampoco, otro nihilismo: la Homeopatía; pero fundado en el principio negado en absoluto por la escuela fisiológica, a saber: en la virtualidad casi espiritual de los agentes medicamentosos, y en la *inidentidad absoluta* de los estados patológicos.

"De este modo, la enfermedad resultaba el mero conjunto de los síntomas, y el medicamento no lo constituía la cantidad, sino la cualidad, hasta el punto de afirmar que a menos materia más virtualidad.

"Antojósele al sistema que el árnica determinaba los mismos efectos y síntomas que los que produjera una paliza, declarando el árnica como específico poderoso contra la vulneración, ya fuera por caída, trancazo o cuchillada.

"Afamóse con esto, y no fue necesario más. Pasó al vulgo, y durante muchos años, chico o grande, culto o inculto, se propinó el árnica por su propia cuenta a cualquier batacazo o coscorrón. Pasarán los años, quedará el eco entre el vulgo ignorante, y seguirá usando el árnica como medicina popular.

"Aquí vemos que la terapéutica científica pasa a la medicina del pueblo.

”Pues veamos un hecho opuesto.

”Llega a saberse que los indios del Perú mascan las hojas de la coca para resistir la fatiga de las marchas. Los médicos se apoderan de la noticia, y ordenan la coca como fortificante y restaurante; no consigue efecto y la administran como alimento de ahorro; no consiguen cosa y, casi a punto de descrédito, se descubre que embota la sensibilidad local, obteniendo de la coca su alcaloide y con él la preciosa adquisición de la cocaína.

”Aquí vemos que la ciencia del vulgo contribuye a la de los sabios con un utilísimo recurso.

”Pues esto que vemos sucede en nuestros propios días ha venido ocurriendo por los siglos de los siglos.

”Así, no hay más que leer a Dioscórides, o sin ir tan lejos cualquier farmacopea antigua, para verla plagada de las mismas extravagancias y porquerías que se encuentran en la medicina del Folk-Lore.

”En esos libros y esos códices científicos encontramos la piedra bezoar, los excrementos de varios animales, el aceite de alacrán, el *oleum serpentarum*, la uña de la gran bestia; y en Dioscórides veréis cuán eficaz resulta para corregir la impotencia un barbo ahogado en vino.

”Se dirá que aquéllos eran tiempos bárbaros, y que no había ciencia, propiamente dicha. Mucho decir es negar la ciencia cuando ya habían andado por el mundo los Sócrates y Platones, los Hipócrates y Aristóteles; pero, en fin, señalemos otras épocas más recientes. La del siglo de oro, la llamada así por haber producido todos sus frutos el renacimiento y la reforma.

”Pues en la botica del Real Sitio de San Ildefonso creada por entonces, encontraréis todavía la uña de la gran bestia, una gran colección en bezoares, como regios, el cráneo filosóficamente preparado, y cuantos trampantojos puedan imaginarse.

”A mi entender no sólo ha existido y sigue existiendo esa compenetración y ese comercio entre la terapéutica del pueblo y la de los sabios, sino que, a juzgar por lo que ocurre en otras esferas del arte y de la ciencia, el comienzo, origen y fundamento de la medicina, como de la poesía, como de la jurisprudencia, como de la filosofía, como de las matemáticas, etc., etc., reside y partió del sentido común, esto es, del vulgo de las gentes.

”Estas, ya con su instinto, ya con su observación, ya con su lógica natural, vieron, observaron o discurrieron una cosa, y esta cosa pasó a ser conocimiento o embrión del saber; después otra, y luego otra, y los científicos relativos o más sabidores, en cada época, fueron coleccionando aquellos saberes, relacionándolos como podían, ya con acierto, ya sin él; unas veces bajo un principio, ya a la vislumbre de otro, y así, de mayor a menor imperfección y de menor a mayor complicación, se han venido desenvolviendo las ciencias y las artes.

”No hay duda que el primer médico no fue un doctor; ni el primero que ordenó un combate un general; ni el primero que inventó un refrán un académico.

”Mirando el asunto de este modo, crece el interés del estudio de la medicina popular, viéndose en último término que la terapéutica obedece al mismo principio que la terapéutica de los sabios.”

Las ideas y noticias del cirujano gaditano fueron comentadas por Machado en una “Carta al Señor Don Federico Galí” que cierra el volumen. “El Folk-Lore en todas sus ramas —afirmó en ella— y el de la medicina especialmente, es interesantísimo y constituye con razón, como asegura Mr. Black, uno de los capítulos más interesantes de la cultura humana. En España, por desdicha, no estamos todavía para esto, y los valientes y generosos compañeros que me han auxiliado en la tarea que creí fecunda de interesar a España en el estudio del Folk-Lore se ven hoy precisados a enviar sus trabajos y libros al extranjero en busca de editores más cultos y críticos más entendidos que los que de ordinario en España se estilan; y digo de ordinario, porque tampoco faltan en absoluto las excepciones; de ello es buena prueba la que dan los editores catalanes y el mismo editor de esta interesante obra, más atento a fomentar la cultura española que a obtener un lucro que ciertamente con libros del Folk-Lore no se obtienen hoy todavía en España.”

Como antes hemos dicho, el volumen incluye asimismo la reimpresión del trabajo *Supersticiones españolas de medicina popular*, de Eugenio Olavarría y Huarte, secretario de la sociedad “El Folk-Lore Castellano”. La situación descrita por Antonio Machado Alvarez se refleja en el hecho de que se publicara originalmente en el volumen cuarto (correspondiente al año 1885) del *Archivio per lo Studio delle Tradizioni popolari*.

De la traducción castellana del libro de Black, algunos de cuyos ejemplares llevan la fecha de 1888, ha aparecido recientemente una reedición facsímil precedida de una presentación de Jordi Pablo.

Los espacios en gris corresponden a publicidad en la edición impresa

Cambio climático global

Los datos recogidos señalan que la intervención del hombre en la producción de dióxido de carbono y metano ha comenzado a alterar el clima; deben tomarse medidas radicales para impedir cualquier variación ulterior

Richard A. Houghton y George M. Woodwell

El mundo se está calentando. Las zonas climáticas están cambiando de posición. Los glaciares se están fundiendo. El nivel del mar está subiendo. No son sucesos encabalgados y de tensión creciente sacados de una película de fantasía científica. Los cambios mencionados y otros más acontecen ahora. Los autores creen que se acelerarán en los próximos años, a medida que aumenten las cantidades de dióxido de carbono, metano y otros gases escasos que se acumulan en la atmósfera como consecuencia de la actividad humana.

El calentamiento, rápido ahora, puede adquirir mayor celeridad en virtud del propio calentamiento; y continuará en un futuro indefinido, a menos que se tomen las medidas necesarias para frenarlo o detenerlo. Medidas de vasto alcance que no resultarán fáciles: reducción del 50 por ciento en el consumo global de combustibles fósiles, detención de la desforestación y programa de repoblación forestal en gran escala.

Hay pocas opciones. El calentamiento rápido y continuo, funesto para la agricultura, acabará con la muerte de extensas zonas de bosque y planteará graves dudas sobre la provisión de agua y la inundación de regiones costeras. La fusión del hielo que ahora cubre el océano Artico arrastrará otros cambios imprevisibles en el clima global. Puede discutirse si los datos manejados son adecuados o si el calentamiento se debe a cambios en la atmósfera. Pero hay acuerdo mayoritario sobre la condición dominante en el clima global de la centuria que viene: el calentamiento producido por la acumulación de gases capaces de aprisionar calor. Las consecuencias derivadas configuran una amenaza suficiente para que muchos científicos, ciudadanos y políticos demanden ya acciones inmediatas para detener el calentamiento.

RICHARD A. HOUGHTON y GEORGE M. WOODWELL han colaborado durante más de veinte años en cuestiones relativas al medio ambiente. Houghton, ecólogo, se halla adscrito al centro de investigación Woods Hole. Durante los últimos diez años se ha ocupado del ciclo global del carbono y se ha especializado en la respuesta de los ecosistemas, los bosques sobre todo, a los cambios climáticos. Woodwell, ecólogo también, es director del centro de investigación de Woods Hole. Con otros colaboradores de ese centro, ambos ecólogos esperan proponer modelos de gestión de recursos renovables.

Existe un hecho reconocido: los gases capaces de aprisionar calor han venido acumulándose en la atmósfera. Así, en ésta, y desde mediados del siglo XIX, la cantidad de dióxido de carbono ha aumentado en un 25 por ciento. Incremento que es fruto de la actividad humana, en particular la combustión de carbón y petróleo; ésa y la destrucción de los bosques han arrojado a la atmósfera cantidades de dióxido de carbono mayores que las liberadas por difusión en los océanos o por fotosíntesis en tierra [*véase la figura 2*].

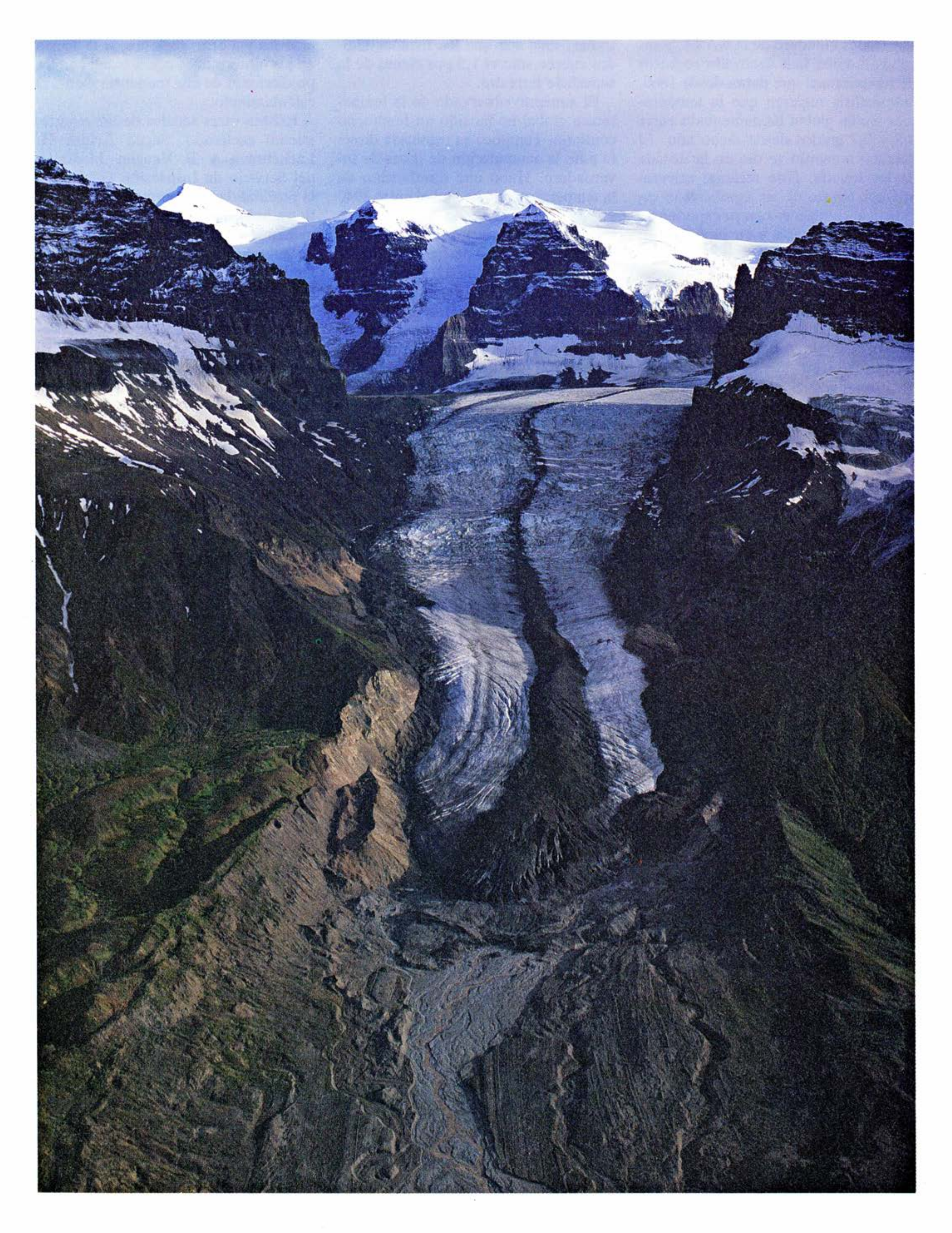
El aumento del dióxido de carbono parece insignificante si pensamos que la cantidad total que hay en la atmósfera apenas supera el 0,03 por ciento del volumen de ésta. Ahora bien, pese a su baja concentración, él y otros gases presentes en cantidades todavía menores desempeñan un importante papel en la determinación de la temperatura de la Tierra. En contraposición con nitrógeno y oxígeno, que constituyen juntos más del 99 por ciento de la atmósfera, nuestros gases traza absorben radiación infrarroja, o calor radiante. Actúan, en este aspecto, como el vidrio que cierra un invernadero; de ahí el apelativo común de gases de invernadero.

Debido a la escasa cuantía total de esos gases de invernadero, sus concentraciones cambian fácilmente. El aumento en la concentración de cualquiera de ellos potencia la capacidad de la atmósfera para retener calor y eleva la temperatura a la cual la atmósfera está en equilibrio con la energía que recibe del Sol. A lo largo de los últimos años, los investigadores han venido advirtiendo también el ritmo progresivo de crecimiento, en la carga atmosférica de gases de invernadero, del metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los halocarburos. A mediados de nuestra década, esos gases distintos del CO_2 habían alcanzado ya niveles cuyo efecto combinado se acercaba al del dióxido de carbono.

En este artículo nos ocuparemos sobre todo del dióxido de carbono y del metano por una triple razón: son los responsables principales del actual calentamiento, sus concentraciones dependen de los procesos biológicos y el retardo o detención del calentamiento global requerirá el control específico de las emisiones de dióxido de carbono.

El calentamiento global por acumulación de gases capaces de retener calor, el dióxido de carbono en particular, fue predicho, al alborear el siglo, por Svante Arrhenius, en Suecia, y Thomas C. Chamberlin, en los Estados Unidos. La investigación sistemática de la acumulación atmosférica del dióxido de carbono no se inició hasta 1958. Desde entonces, Charles D. Keeling, de la Institución Scripps de Oceanografía, ha venido suministrando un registro continuo del nivel de dióxido de carbono en varias estaciones, en la hawaiana Mauna Loa entre otras [*véase la figura 3*].

Mayor dificultad implica acopiar datos relativos a la temperatura de la Tierra. Hasta finales de 1988 no se dispuso de información fiable del calentamiento global. La prueba más directa se basa en registros de temperatura procedentes de todo el mundo. James E. Hansen, del Instituto de Estudios



1. GLACIAR DEL AGUJERO EN LA PARED, en el Parque Nacional Wrangell-St. Elias de Alaska. El suelo descubierto al pie del glaciar muestra, en esta vista aérea, estriaciones y morrenas, apilamientos de restos que deja un glaciar en movimiento; no ha habido tiempo de que crezca vegetación en el suelo. Son signos todos ellos de una reciente retirada del glaciar. El comportamiento similar de cierto número de glaciares alrededor del mundo [*véase la figura 5*], la creciente profundidad hasta el permafrost, junto con otros datos sugieren que el calentamiento ha continuado desde el último período glacial. Pero su causa, a medida que nos adentramos en un pasado remoto, anterior a la actual acumulación de gases de invernadero, queda envuelta en un obscuro misterio.

Espaciales Goddard de la NASA, y sus colaboradores han analizado registros de temperatura que datan desde 1860. Sus análisis sugieren que la temperatura media global ha aumentado entre 0,5 y 0,7 grados desde dicho año. El máximo aumento se dio en la década de los setenta. Este reciente calentamiento, aparte de su significación estadística, concuerda con su experiencia basada en la teoría y en modelos del sistema climático global.

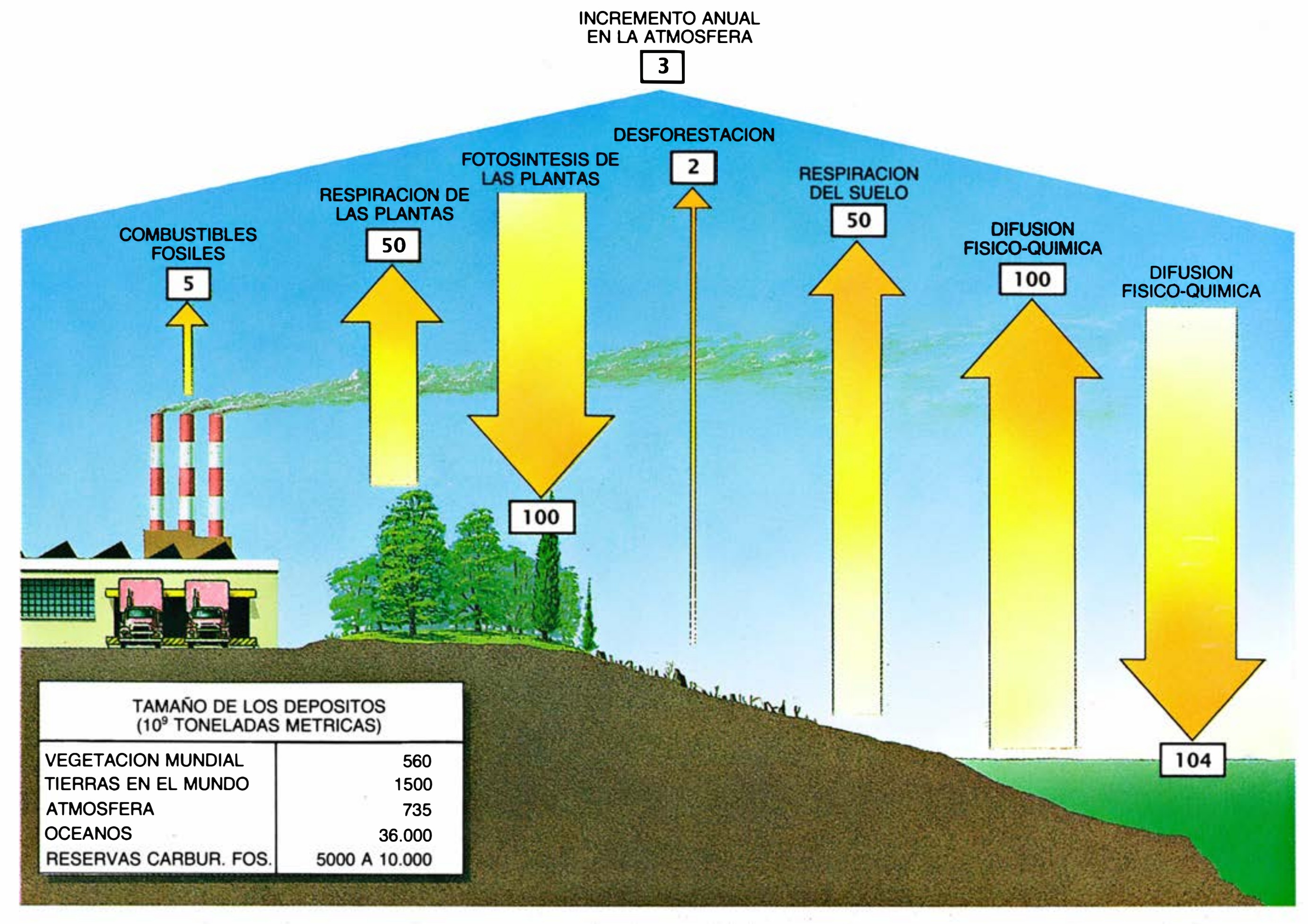
Por su parte, Thomas M. L. Wigley y colaboradores, que han venido trabajando independientemente en la Universidad de Anglia Oriental, han corroborado ese aumento de la temperatura media global. La subida no se ha observado en todas las regiones: el análisis reciente de archivos climáticos abordado por Kirby Hanson y sus colegas, de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica, no muestra tendencia creciente de la temperatura en los Estados Unidos. (Su estudio no abarca Alaska ni las islas Hawai.) Discrepancia regional que a nadie debe extrañar, toda vez que los Estados Unidos cubren sólo el 1,5 por ciento de la superficie terrestre.

El aumento observado de la temperatura global no ha sido un fenómeno continuo. Tampoco es respuesta directa ante la acumulación de gases de invernadero. Hubo una disminución de la temperatura media global entre 1940 y 1965, pese al continuo incremento de los gases que retienen calor en la atmósfera. Lo que no destruye la conclusión a que llega Phil D. Jones, colaborador de Wigley, según la cual la temperatura global habría aumentado unos 0,5 grados desde comienzos de siglo; los seis años más cálidos registrados fueron los de 1988, 1987, 1983, 1981, 1980 y 1986, por ese orden.

A los que reputan insignificante una variación de temperatura de 0,5 grados, habría que recordarles que, en 1816, el "año sin verano", el descenso de la temperatura media global no llegó a un grado. Bastó, sin embargo, para provocar heladas en junio y malas cosechas en muchos lugares. El calor y la sequía que han afligido a Norteamérica y a otras regiones de la Tierra en los últimos años concuerdan con las predicciones de una tendencia global al calentamiento.

Existen otras señales de un calentamiento acelerado. Según Arthur H. Lachebruch y B. Vaughn Marshall, del Servicio de Inspección Geológica, la profundidad del permafrost, capa de tierra helada en Alaska y el Artico canadiense, ha aumentado en los últimos decenios. Ha subido la temperatura media de los lagos canadienses; mengua la extensión anual máxima de hielo de los mares árticos y el hielo que rodea el continente antártico, y retroceden los glaciares continentales en Europa y otras partes.

Estas observaciones están de acuerdo con las predicciones realizadas por los climatólogos, que se fundan en la teoría ayudada por los modelos de circulación general. Se han ideado varios modelos. Y aunque los análisis basados en ellos no concuerdan en todos sus pormenores, las predicciones generales se ajustan a lo dictado por la teoría y a lo registrado por la observación. Los



TAMAÑO DE LOS DEPOSITOS (10^9 TONELADAS METRICAS)	
VEGETACION MUNDIAL	560
TIERRAS EN EL MUNDO	1500
ATMOSFERA	735
OCEANOS	36.000
RESERVAS CARBUR. FOS.	5000 A 10.000

2. FLUJOS ANUALES DE CARBONO, expresados en unidades de 1000 millones (10^9) de toneladas métricas. La fotosíntesis continental elimina, anualmente, unos 100.000 millones de toneladas de carbono de la atmósfera en forma de dióxido. La respiración vegetal y el suelo devuelven, cada uno, unos 50.000 millones de toneladas. La combustión de carburantes fósiles y la deforestación lanzan a la atmósfera 2000 y 5000 millones de toneladas, respectivamente. Los procesos fisicoquímicos que se desarrollan en la superficie del mar liberan a la atmósfera unos 100.000 millones de toneladas y absorben otros 104.000 millones. La ganancia atmosférica neta se cifra en unos 3000 millones de toneladas anualmente. La tabla recoge los principales depósitos de carbono del mundo.

climatólogos esperan que el máximo calentamiento se produzca en las latitudes altas en invierno. En estas latitudes, el calentamiento, avanzan los modelos, doblará, por lo menos, el promedio global. Se prevé, además, el enfriamiento de la alta atmósfera mientras que se calentará la baja atmósfera; habrá, asimismo, menos precipitación y menos humedad en el suelo a latitudes más bajas. Tendencias que se han comprobado en los últimos años.

Ese tipo de datos se halla siempre abierto a análisis, interpretaciones y exageraciones ulteriores. Parecen adolecer invariablemente de las insuficiencias de las mediciones y de las dudas concernientes a la longitud del período durante el cual se tomaron los datos. Aunque los investigadores refinan día a día registros y análisis, el hecho, inamovible, sigue ahí: las observaciones descritas y la creciente concentración de gases de invernadero constituyen una prueba sólida de que el proceso que anticipara Arrhenius hace casi un siglo continúa su curso.

Podemos aprender mucho sobre los cambios potenciales del clima del futuro si examinamos los ocurridos en el pasado. Apenas 15.000 años atrás, los glaciares cubrían gran parte de Norteamérica y del norte de Europa. ¿Se produjeron cambios en la composición de la atmósfera implicados en las grandes oscilaciones climáticas que trajeron los períodos glaciales e interglaciales? No tenemos una respuesta tajante. Pero se ha dado un paso decisivo en los últimos años con la posibilidad de determinar la composición atmosférica del ayer remoto a partir de muestras diminutas de aire aprisionadas en los hielos. En particular, se ha identificado la composición atmosférica durante los períodos de expansión y de retroceso de los glaciares gracias a un testigo de hielo perforado por un grupo franco-soviético en la estación antártica de Vostok.

El testigo de Vostok, así se le conoce, medía 2000 metros de longitud, suficiente para obtener muestras de hielo que se remontaban a los últimos 160.000 años [*véase la figura 4*]. Los datos muestran fluctuaciones de temperatura de hasta 10 grados; tales fluctuaciones se deducen de las variaciones de los cocientes isotópicos en el testigo. Por ejemplo, está bien establecido que la relación de los dos isótopos comunes del oxígeno, ^{18}O y ^{16}O, en testigos de sedimentos marinos, refleja los cambios de temperatura en el pasado.

Los datos de Vostok muestran también de qué modo la concentración de gases atmosféricos ha fluctuado con la temperatura a lo largo de ese dilatado intervalo: cuanto más alta era la temperatura, tanto mayor resultaba ser la concentración de dióxido de carbono, y viceversa. Cierto es que la correlación del dióxido de carbono con la temperatura no establece si los cambios en la composición atmosférica fueron la causa de las tendencias al calentamiento y enfriamiento, o si éstas produjeron aquéllos. Aunque el contenido de dióxido de carbono sigue muy de cerca la evolución de la temperatura durante los períodos de deshielo, queda rezagado durante los períodos de enfriamiento.

Pese a la estrecha relación estadística entre dióxido de carbono y temperatura a lo largo del registro histórico, las variaciones de temperatura son de 5 a 14 veces mayores de lo que cabría esperar a tenor de las propiedades radiativas del dióxido de carbono. Esta relación sugiere que, aparte de los cambios de concentración en los gases de invernadero, intervienen otros procesos de realimentación positiva que refuerzan la respuesta; entre ellos, quizás, el hielo marítimo y continental, las nubes o el vapor de agua, que también absorben calor radiante.

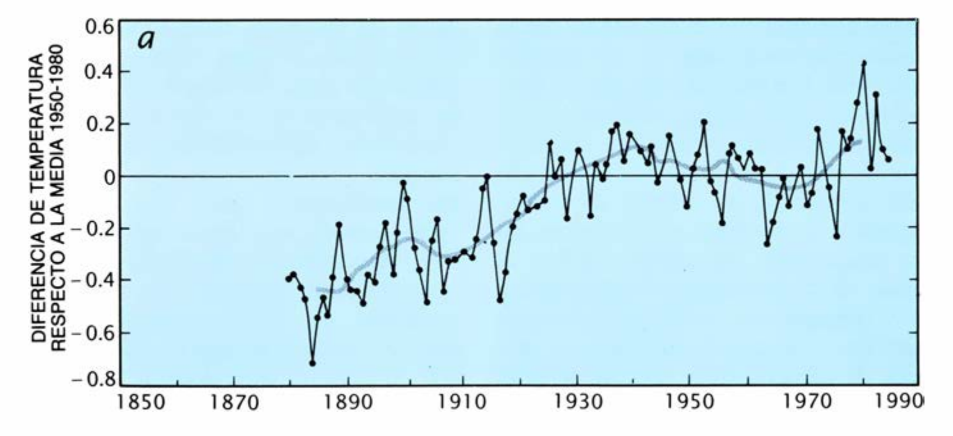
Otros datos de la misma muestra de Vostok revelan que el metano sigue también estrechamente el comportamiento de la temperatura y dióxido de carbono. La concentración de metano vino casi a duplicarse entre el máximo del penúltimo período glacial y el período interglacial inmediato. Dentro del presente período interglacial, se ha multiplicado por más de dos en los últimos 300 años, y aumenta con rapidez. Aunque la concentración de metano atmosférico es inferior, en más de dos órdenes de magnitud, a la del dióxido de carbono, no se puede ignorar: las propiedades radiativas del metano lo hacen veinte veces más eficaz que el dióxido de carbono, molécula por molécula, en la absorción de calor radiante. Basándose en el modelo radiativo-convectivo de Hansen, que incorpora realimentaciones de carácter químico, al metano parece haberle correspondido la cuarta parte de la importancia del dióxido de carbono en el calentamiento que se produjo durante la última retirada de los hielos, hace entre 8000 y 10.000 años.

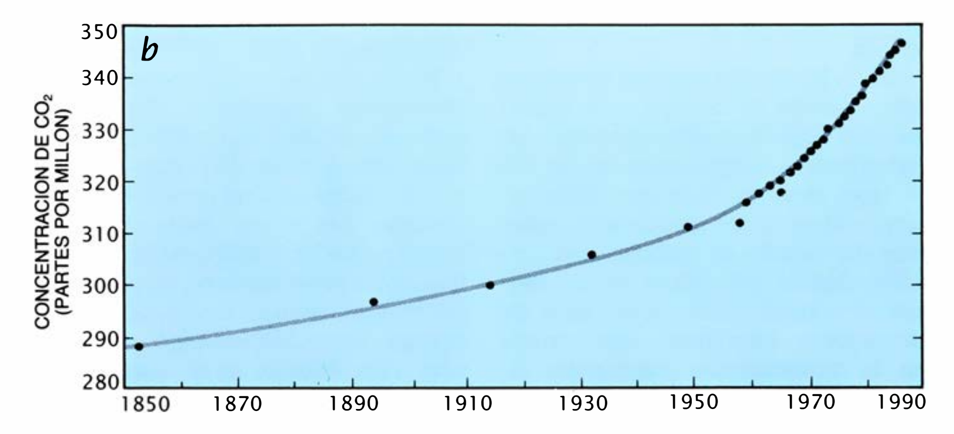
¿Por qué el aumento global de temperatura insta mayores desprendimientos de dióxido de carbono y metano a la atmósfera? En el proceso de fotosíntesis, las plantas terrestres sustraen de la atmósfera unos 100.000 millones de toneladas de carbono anuales: en torno al 14 por ciento del contenido que posee de ese gas. El proceso de respiración de las plantas y la descomposición de la materia orgánica devuelven a la atmósfera una cuantía aproximadamente igual. Ese flujo de doble sentido representa una proporción importante del dióxido de carbono presente en la atmósfera en cualquier momento; por tanto, cualquier variación de unos pocos puntos de porcentaje en el flujo respiratorio o en el fotosintético no tardará en alterar de manera apreciable el contenido de dióxido de carbono atmosférico. ¿Producirá el calentamiento global tal desequilibrio?

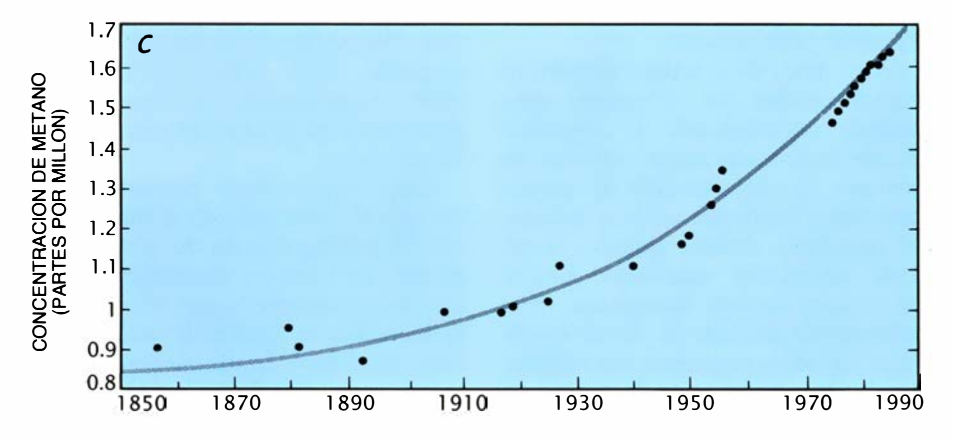
No lo sabemos a ciencia cierta. Probablemente seguiremos ignorándolo hasta que el clima haya cambiado bastante más. A pesar de lo cual creemos que el cuadro general podría ajustarse bastante bien al que ahora esbozaremos. La tasa de fotosíntesis se ve afectada por muchos factores, en particular por la disponibilidad de luz, agua y nutrientes. No es, sin embargo, muy sensible a los altibajos de la temperatura. Por otra parte, los ritmos de respiración y degradación de las plantas dependen fuertemente de la temperatura. Una variación de temperatura de un grado, hacia arriba o hacia abajo, altera frecuentemente el ritmo de respiración de las plantas entre un 10 y un 30 por ciento.

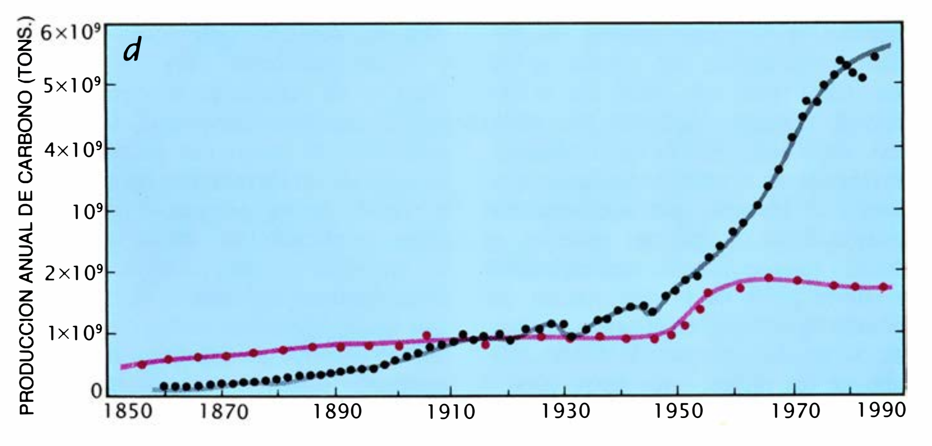
Estas observaciones mueven a pensar que el calentamiento global acelerará la biodegradación de materia orgánica, sin notables alteraciones en la tasa de fotosíntesis; lo que comportaría la liberación de dióxido de carbono hacia la atmósfera. El calentamiento dará también por resultado más metano, porque la respiración lo produce en lugares donde el oxígeno no se halla fácilmente accesible (pantanos, ciénagas y suelos húmedos). En los últimos años, se ha registrado un aumento en más del uno por ciento anual de la concentración de metano en la atmósfera. Se trata de un incremento rápido e importante a la vez, porque, lo indicamos antes, la eficacia del metano a la hora de aprisionar el calor multiplica por 20 el rendimiento del dióxido de carbono. Los suelos húmedos, en los que el metano constituye un resultado de la degradación anaerobia, representan, probablemente, la principal fuente mundial de ese gas. El calentamiento global ya producido ha estimulado la degradación anaerobia y la formación de metano, así como la de dióxido de carbono.

Se puede estimar, al menos de manera aproximada, la magnitud del in-









3. CORRELACION, en los tres primeros gráficos, entre la variación global de temperatura, el nivel de los gases capaces de aprisionar calor y las emisiones de dióxido de carbono. Corresponden a los últimos 140 años. En el gráfico *a* se representan la temperatura media anual (*curva irregular*) y la media circulante de cinco años (*curva fina*). Los gráficos *b* y *c* muestran los contenidos de dióxido de carbono y metano en la atmósfera. Los datos anteriores a 1958 provienen del análisis de las burbujas de aire aprisionadas en hielos glaciares. La producción anual de carbono procedente de la combustión de carburantes fósiles (*negro*) y del cambio en el uso de las tierras (*color*) aparece en *d*; los últimos datos se obtuvieron de fuentes históricas.

cremento resultante de producción de carbono. Una fracción apreciable (del 20 al 30 por ciento) de la respiración global en el suelo se registra en los bosques y la tundra de las latitudes medias y altas, que es donde se espera el máximo calentamiento. Si suponemos que el calentamiento medio global ha sido, hasta la fecha, de 0,5 grados Celsius y, de un grado, en las latitudes medias y altas, la respiración de las plantas en esas latitudes y la descomposición de la materia orgánica en el suelo habrá aumentado apreciablemente. Si el incremento de la respiración se cifra del 5 al 20 por ciento en el 20 al 30 por ciento del área respirante total, la respiración global crecerá entre un 1 y un 6 por ciento por encima de lo normal. Suponiendo de nuevo que el flujo anual de carbono hacia la atmósfera sea de 100.000 millones de toneladas y que la tasa de fotosíntesis permanezca invariable, el calentamiento ya experimentado ha significado una inyección de 1000 a 6000 millones de toneladas de carbono anuales. A lo largo de los últimos cien años pudo haberse liberado así entre 20.000 y 30.000 millones de toneladas.

Quizá se trate de una estimación al alza, porque el calentamiento medio pudo haber sido inferior al supuesto y la respuesta fotosintética habría amortiguado la liberación de dióxido de carbono. Pero no creo que lo estimado supere el doble del valor real. En todo caso, sirve para subrayar la importancia de los mecanismos bióticos de realimentación.

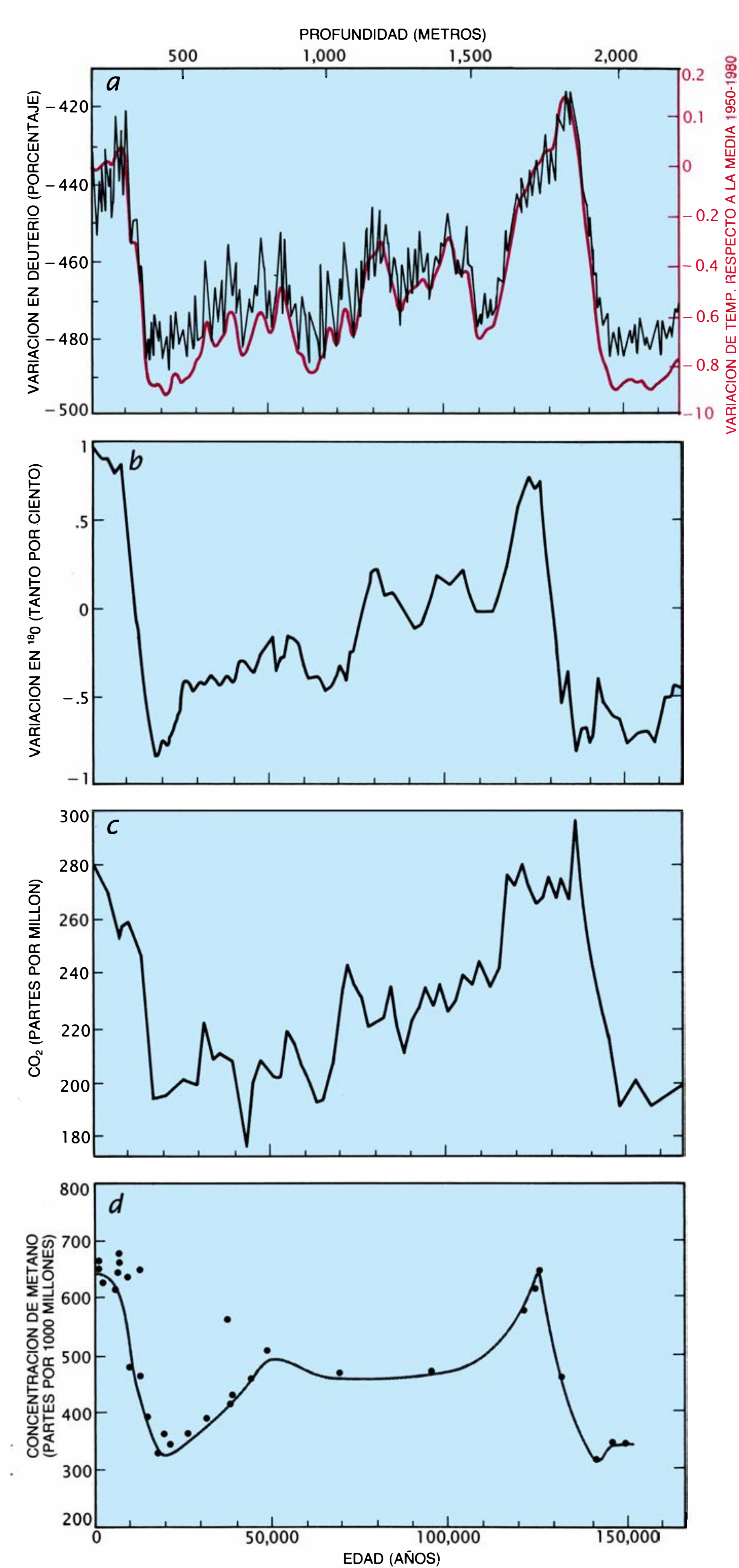
¿Cómo se relaciona el valor calculado con la cuantía de dióxido de carbono desprendida por otros procesos? La liberación por combustión de carburantes fósiles se cifra en torno a los 5600 millones de toneladas por año; la deforestación añade una cantidad estimada entre 400 y 2500 millones de toneladas anuales. Se desconoce la cantidad total de carbono inyectado en la atmósfera por esas dos fuentes, así como el debido a la activación de la respiración por la temperatura, si bien parece superar los 6000 millones de toneladas anuales y acercarse a los 10.000 millones.

La liberación de carbono atribuible a las variaciones en la tasa de respiración podría fluctuar bastante. Un calentamiento gradual, como el experimentado a lo largo de la mayor parte de este siglo, alteraría la tasa respiratoria con una lentitud que impediría apreciar las variaciones de un año a otro. Por otro lado, un calentamiento o enfriamiento

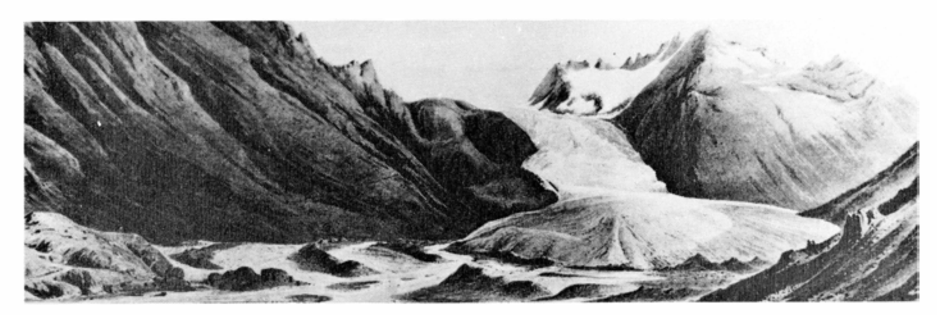
brusco a lo largo de un período de varios años podría desembocar en un cambio observable en la concentración atmosférica de dióxido de carbono. En los últimos 15 años, la tasa anual de acumulación atmosférica de dióxido de carbono ha sido de 1,5 partes por millón, equivalente a una acumulación global de unos 3000 millones de toneladas de carbono.

No obstante, según datos registrados en Mauna Loa y el Polo Sur por Keeling, a lo largo de los últimos 18 meses, la velocidad de acumulación ha aumentado hasta situarse en torno a 2,4 partes por millón, unos 5000 millones de toneladas de carbono. Keeling supone que se trata de un episodio transitorio, como ya ocurrió con otros aumentos menores en 1973 y 1974. Pero sospechamos que las observaciones de tal incremento obedecen a las altas temperaturas de nuestra década, retrasadas en el tiempo necesario para calentar el suelo. Queda por ver si esta interpretación es correcta.

Es de presumir también que cualquier cambio climático afecte la capacidad retentiva de carbono que poseen los ecosistemas terrestres, en particular bosques y suelos. Con tasas de calentamiento inferiores a las que precisan para su desarrollo, los bosques podrían expandir su área de distribución y, con ello, la capacidad para almacenar carbono. Pero si la tasa de calentamiento supera el valor que favorece la emigración del bosque hacia otras regiones climáticas, es probable que asistamos a una extinción general de árboles y otras plantas. No es tarea fácil predecir el resultado neto de esa destrucción de la masa forestal; implicará, a buen seguro, una mayor liberación de CO_2 a la atmósfera, como consecuencia de la descomposición de plantas, animales y materia orgánica de los suelos.



4. DATOS DEL TESTIGO de hielo de Vostok. Nos revelan la correlación entre la concentración de ciertos gases y la temperatura en los últimos 160.000 años. El testigo de hielo, de 2200 metros de largo, contiene burbujas de aire con dióxido de carbono y metano que quedaron aprisionadas a distintas profundidades (*escala superior*) y, por tanto, en diferentes épocas (*escala inferior*). Por métodos distintos e independientes se ha establecido que la concentración de deuterio en el hielo constituye un buen criterio para discernir la temperatura del pasado; temperatura y nivel de deuterio aparecen representados en *a*. Más tradicional es el uso del isótopo del oxígeno ^{18}O para estimar la temperatura; la curva *b* es casi idéntica a la *a*. La notable concordancia con la forma de la curva del dióxido de carbono de la base de Vostok, *c*, indica que también el dióxido de carbono sirve de termómetro global. Los datos del metano antártico compilados en 1985 y 1986 de distintas bases (*d*) apoyan la conclusión según la cual los niveles de gases de invernadero guardan una correlación positiva con la temperatura. Podrían ya influir en ella.





5. GLACIAR DEL RODANO, en Suiza. La litografía superior se tomó de una acuarela de 1848 pintada por Henri Hogard. Se aprecian cuatro series de morrenas. La más externa corresponde, según datación, a 1602, la segunda a 1818, la tercera a 1826 y la cuarta a 1848; la configuración indica que el glaciar ha estado retrayéndose valle arriba durante 250 años. Una fotografía de 1970 (*abajo*) muestra que el glaciar se ha retirado más, valle arriba. La retracción es una prueba adicional del reciente calentamiento global.

La cantidad de dióxido de carbono que llegaría a la atmósfera dependería, en gran medida, de la velocidad del cambio climático en las zonas boscosas de las latitudes medias y altas. La imposibilidad de establecer un cálculo moderadamente aproximado no impide reconocer la existencia de un límite superior dado por la cantidad de carbono en esas latitudes boscosas: unos 750.000 millones de toneladas métricas, aproximadamente la misma cantidad de carbono que hay ahora en la atmósfera.

¿Podría un calentamiento global estimular el crecimiento de los bosques? Si así fuera, la invasión de las altas latitudes y regiones de tundra por los bosques provocaría que éstos tomasen una mayor cantidad de dióxido de carbono de la atmósfera y que se acumulara su concentración en el suelo. Pero esa transición es improbable. Los bosques necesitan siglos para desarrollarse, especialmente donde las capas de tierra son de poco espesor y los nutrientes, escasos. Necesitan también estabilidad climática y fuentes de semillas. Las transiciones climáticas a las que estamos asistiendo, de no hallar qué las detenga, progresan con rapidez, y cabe presumir que continúen así en el futuro inmediato. No traen las condiciones idóneas para el desarrollo de bosques en nuevas tierras para permanecer en ellas largo tiempo.

¿Podría, al menos, el calentamiento estimular los bosques existentes para que almacenasen carbono adicional en las plantas y en el suelo? Quizá. Los bosques boreales y otros bosques de coníferas podrían, en efecto, resistir y responder al calentamiento con un aumento de la fotosíntesis y del crecimiento. Queda abierta la cuestión sobre el carbono captado en la fotosíntesis: ¿se retendrá o se liberará a través de una respiración más activa?

La tundra, llanura sin árboles de regiones árticas y subárticas, podría responder al calentamiento con soluciones sorprendentes, verbigracia, intensificando la producción de carbono y almacenándolo en la turba. La naturaleza de la respuesta dependerá, en buena parte, del agua disponible. Una tundra más húmeda podría admitir mayor concentración de carbono en los suelos; otra más seca podría desprenderlo en la descomposición de la materia orgánica de una capa de tierra helada desde hace mucho tiempo, o que está normalmente helada durante la mayor parte del año. W. Dwight Billings, de la Universidad Duke, cree que el calentamiento global acelerará la descomposición de la turba en tierras de tundra y precipitará el derrumbamiento final de ésta; la erosión por karst térmico —tecnicismo que remite al desplome de la tundra— permite al agua corriente cuartear la llanura en extensiones de media hectárea. Amén de esa agresión contra la tundra, se liberan a la atmósfera cantidades importantes de dióxido de carbono y metano que estaban almacenadas en la turba en forma de carbono.

Los datos que tenemos inducen a creer que, en un régimen de rápido calentamiento planetario, el ritmo de respiración aumentará más de prisa que el de fotosíntesis. Los cambios liberarán nuevas cantidades de metano y dióxido de carbono, que pasarán a la atmósfera. La magnitud del desprendimiento dependerá, sobre todo, de la tasa de calentamiento: cuanto mayor sea ésta, tanto mayor la cantidad desprendida. Tal comportamiento se halla en buen acuerdo con los datos del testigo de Vostok, aunque éstos no bastan para demostrarlo.

¿Qué consecuencias derivarían de un calentamiento global continuo? En 1985, un grupo de meteorólogos, reunido bajo los auspicios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y del Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP), puso de manifiesto que, sin los mecanismos respiratorios de realimentación explicados arriba, el efecto combinado de los gases de invernadero calentaría la Tierra entre 1,5 y 4,5 grados antes de llegar a la mitad del próximo siglo. La conclusión se confirmaba hace poco en un trabajo de recopilación escrito por más de 50 científicos que se reunieron en Villach, Austria, en 1987; lo han publicado la OMM y la UNEP.

Pocas veces ha habido un acuerdo tan compartido entre científicos sobre un tema ambiental de interés semejante. El calentamiento —si el tesón del hombre no interviene para detenerlo— será rápido; se dejará sentir de modo distinto según las regiones. Las temperaturas de invierno en las latitudes medias y altas pueden subir más del doble del promedio global. Si la temperatura media global hubiera subido de dos a tres grados para el año 2030, el aumento de temperatura invernal en Minneapolis podría variar entre cuatro y seis grados, es decir, alrededor de un grado por decenio. Las temperaturas estivales ascenderían también, aunque menos. Una variación de temperatura de un grado equivale a una variación de latitud de 100 a 150 kilómetros. El límite de las praderas y los bosques podría emigrar hacia el norte, a una velocidad de entre 100 y 150 kilómetros por decenio, es decir, entre 400 y 600 kilómetros para el año 2030.

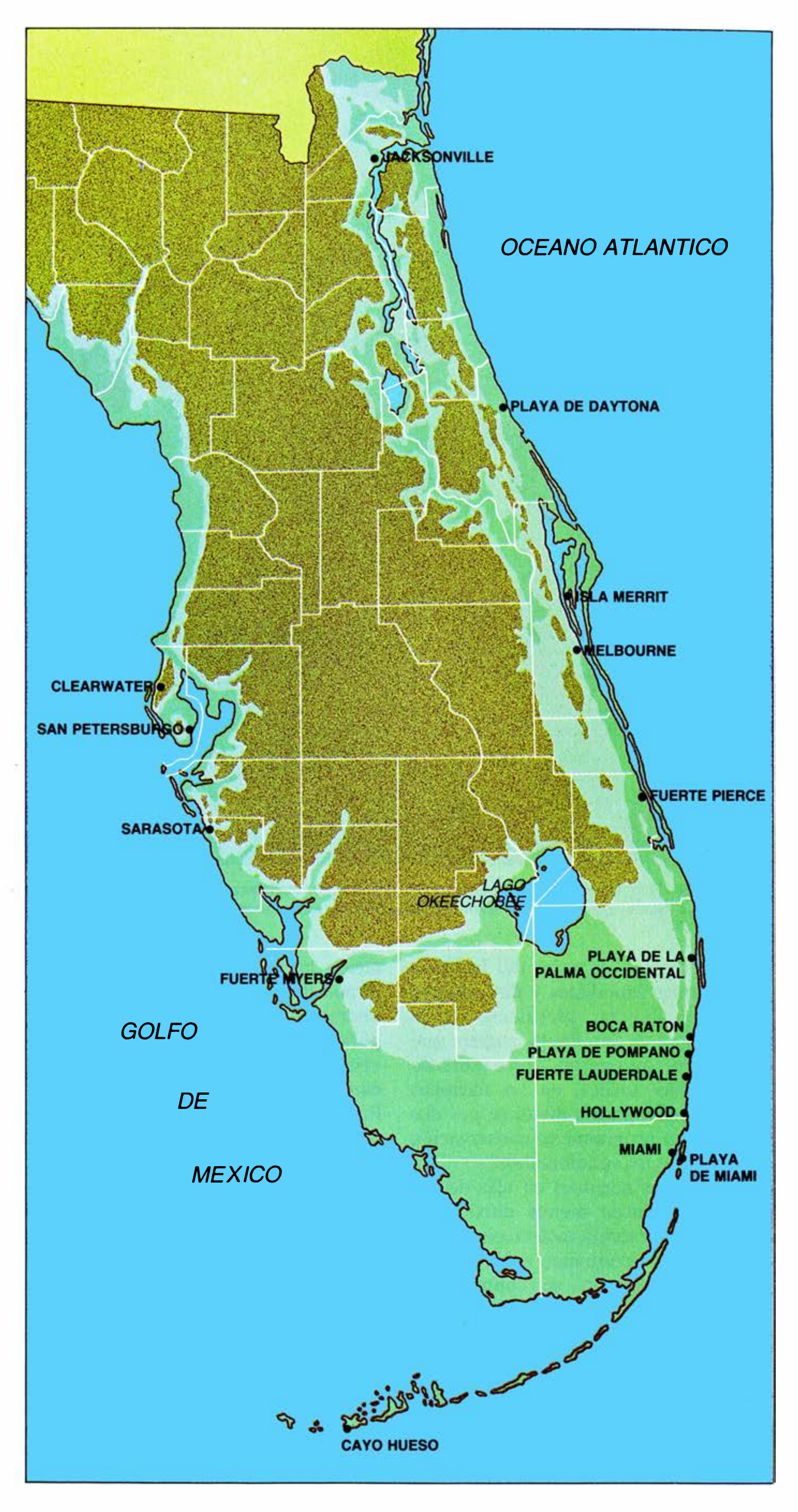
Cambios que traerán no pocas dificultades para la mayoría de la población. Serán, en primer lugar, cambios continuos. A menos que el calentamiento se detenga, los esfuerzos de adaptación al cambio climático pueden convertirse en respuestas ante condiciones que desaparecieron. En segundo lugar, esos cambios de clima serán irreversibles, en el intervalo temporal en que nos movamos nosotros o nuestros

hijos. No hay manera de enfriar la Tierra, ni rebajar el nivel del mar; no podemos volver, de la noche a la mañana, a una atmósfera con menores concentraciones de gases de invernadero. Lo mejor que podríamos hacer sería restringir las emisiones actuales. Si se tomara esta medida de inmediato, conoceríamos todavía un calentamiento adicional de más de un grado, conforme se fueran dejando sentir los efectos totales de los gases de invernadero que hay ya.

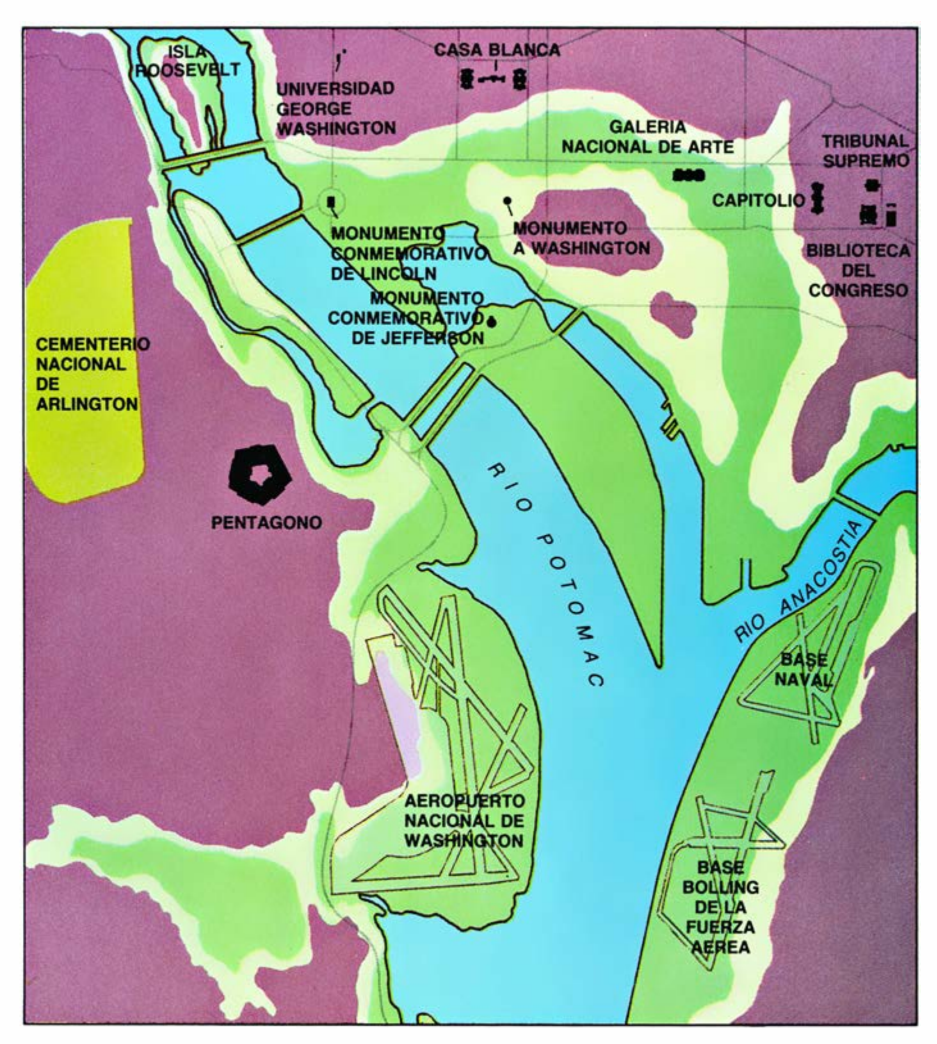
Por último, los efectos son de carácter abierto. Aunque la mayoría de los modelos elaborados hasta la fecha simulan una duplicación de la concentración de dióxido de carbono, no existe razón alguna para suponer que las concentraciones se detendrán en la duplicación del valor actual. Las reservas estimadas de combustibles fósiles utilizables bastan para multiplicar la concentración de dióxido de carbono atmosférico por un factor entre 5 y 10.

¿Podemos hacer algo para frenar el cambio climático que se está produciendo? Urge estabilizar de inmediato el contenido atmosférico de los gases de invernadero. Independientemente de su fuente, el carbono ha venido acumulándose en la atmósfera, durante los últimos diez años, a razón de 3000 millones de toneladas anuales. (El resto se está absorbiendo en los océanos o almacenando en los bosques y en el suelo.) Si el flujo actual se redujera en 3000 millones de toneladas anuales, el nivel atmosférico de dióxido de carbono se estabilizaría en pocos años. Estabilización que no sería permanente, a pesar de todo. La tasa de acumulación en los océanos se halla determinada por la velocidad con que pueden absorber dióxido de carbono de la atmósfera; a su vez, ésta depende de la diferencia de concentraciones del dióxido de carbono en la atmósfera y en el océano. Al restringirse el flujo de carbono en exceso, se acorta también la diferencia; el océano pierde entonces capacidad de absorber el exceso de carbono. Habría que limitar todavía más las emisiones de dióxido de carbono para evitar una mayor acumulación atmosférica.

La fuente principal de emisiones de dióxido de carbono reside en la combustión de carburantes fósiles. Cada año desprenden a la atmósfera unos 5600 millones de toneladas de carbono. Las naciones industriales aportan el 75 por ciento de esas emisiones; los pasos para estabilizar la composición deben, pues, comenzar por el mundo industrializado. Un reciente estudio llevado



6. "EL CALENTAMIENTO GLOBAL INUNDA FLORIDA" podría ser el titular de un periódico sensacionalista si los casquetes de hielo polares comenzaran a fundirse. Así quedaría Florida, si el nivel del mar ascendiese 4,6 metros (*verde azulado*) o 7,6 metros por encima (*verde claro*) del nivel actual (*azul oscuro*) del mar. En cualquier caso, Miami y el Lago Okeechobee se sumergirían. Sería de esperar ese ascenso de cuatro a cinco metros si la plataforma de hielo de la Antártida se deshiciese bajo el calentamiento global.



7. WASHINGTON, distrito de Columbia, sometido a las mismas condiciones de la figura 6. El Aeropuerto Nacional y el Monumento a Lincoln están inundados. La curva de 7,6 metros alcanza la Casa Blanca.

a cabo bajo los auspicios del Instituto de Recursos Mundiales y dirigido por José Goldemberg, presidente de la Universidad de São Paulo, sugiere que el consumo de energía procedente de combustibles fósiles, en las naciones desarrolladas, podría dividirse por dos con sólo un programa de conservación y mejora de los rendimientos.

Aunque las naciones en vías de desarrollo producen menos dióxido de carbono, su fracción está creciendo. Si el desarrollo económico sigue el modelo acostumbrado, su contribución potencial será enorme. El segundo paso hacia la estabilización de los gases de invernadero requerirá innovaciones en el desarrollo económico que relajen la dependencia de los combustibles fósiles.

Otra fuente importante de dióxido de carbono sabemos que es la deforestación. Sobre todo, en los trópicos. Hasta 1980 se venían talando anualmente unos 11.000 kilómetros de bosques; ese mismo año de 1980, se lanzaron a la atmósfera de 400 a 2500 millones de toneladas de carbono (en forma de dióxido). El ritmo de deforestación ha aumentado a lo largo de la última década. Si la cuantía actual de liberación de carbono roza el límite superior del intervalo arriba mencionado, el cese de la deforestación reduciría las emisiones de carbono en los 3000 millones de toneladas al año que necesitamos imperiosamente para estabilizar la composición de la atmósfera.

La repoblación forestal ayudaría también a estabilizar la composición de la atmósfera. Con la repoblación de uno a dos millones de kilómetros cuadrados (la superficie de Alaska) lograríamos un almacenamiento anual de 1000 millones de toneladas de carbono. Aunque se trata de una extensión notable, y el suelo productivo es caro y escaso en los trópicos, podría haber hasta 8,5 millones de kilómetros cuadrados de tierra que antaño fueron bosques y no han perdido su capacidad de tornar a serlo. De estas tierras, unos 3,5 millones de kilómetros cuadrados podrían devolverse a los bosques si la agricultura permanente sustituyera a los cultivos transhumantes. Otros cinco millones de kilómetros cuadrados de tierra deforestada persisten sin aprovechar. En ellos podría emprenderse inmediatamente la labor de repoblación. Los bosques establecidos para almacenar carbono deberían conservarse: no se podrían explotar para la industria maderera, ni destruir por efectos tóxicos o por cambios del clima.

Cada una de esas medidas para estabilizar el nivel atmosférico de dióxido de carbono tendría repercusiones saludables local, regional y nacionalmente, amén de sus efectos sobre el cambio climático. Un mejor uso de la energía, medida ésta que debería haberse tomado hace mucho tiempo, con beneficios para todo el mundo, aportaría ventajas económicas y materiales para los individuos y para las naciones. Un mayor rendimiento de la misma reduciría la dependencia de los combustibles fósiles; lo que, a su vez, restringiría las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, la lluvia ácida y la liberación de otras toxinas. Importa detener la pérdida del bosque, para mantener la diversidad genética del planeta, reducir la erosión, estabilizar los climas locales y regionales, limpiar el aire y el agua y guardar el legado de la naturaleza que permita vivir a las generaciones futuras.

No es probable que ningún remedio, por sí solo, estabilice los niveles atmosféricos de dióxido de carbono y metano. Si persiste la acumulación de dióxido de carbono, el exceso de carga se elevará anualmente de 3000 millones de toneladas a 5000 millones; y eso sería mucho más difícil de corregir. Las medidas a tomar empiezan en casa, aunque todo el mundo debe unirse al esfuerzo para que valga la pena. Hay precedentes de acción internacional sobre temas similares. El Tratado de Limitación de Pruebas de 1962 fue un acuerdo entre ciertas naciones para evitar las pruebas atmosféricas de armas nucleares. Se ha respetado. Naciones que no lo firmaron, como Francia y la República Popular China, han cedido a las presiones internacionales y ahora llevan a cabo pruebas subterráneas de sus armas. La Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono y el Protocolo de Montreal, este último negociado en 1987, han impulsado al mundo hacia la eliminación de los halocarburos.

No hay razón para suponer que no se pueda avanzar también en el terreno de los combustibles de carbono y en el de la deforestación. Se han dado incluso ciertos pasos: 50 especialistas en diplomacia y derecho internacional se reunieron recientemente, bajo los auspicios del Centro de Investigación de

Woods Hole, para trazar líneas de actuación que podrían aplicarse con éxito. El mayor problema estriba en asegurarse la cooperación resuelta de las naciones en vías de desarrollo, que están a punto de sumarse al consumo vertiginoso de combustibles fósiles. Pero el desarrollo no tiene por qué seguir forzosamente el mismo camino siempre. En ese sentido, los países de bajas latitudes saldrían ganando inconmensurablemente con el dominio de la técnica de explotación de la energía solar. La electrólisis del agua alimentada por energía solar puede producir hidrógeno, que, a su vez, puede hacer funcionar automóviles y otra maquinaria. Hay pocos lugares en Occidente donde no pueda producirse agua caliente para uso doméstico con energía solar a bajo coste durante la mayor parte del año. Además, las naciones no ganan nada con permitir la destrucción de sus bosques.

Las naciones en vías de desarrollo están buscando, en reuniones y conferencias, opciones alternativas al rumbo actual. Se celebró la primera en Nueva Delhi, en febrero; la segunda tendrá São Paulo por sede, en septiembre, bajo la dirección de Goldemberg. Se solicitan en ellas las respuestas de las naciones en vías de desarrollo a un mundo cuyas fuentes tradicionales de energía son limitadas. Se ofrecen extraordinarias oportunidades de innovación industrial, sobre todo en el ámbito del rendimiento energético y la energía solar. Pero no debe esperarse que los países en vías de desarrollo carguen con todos los gastos; las naciones avanzadas, que son responsables, en buena parte, del problema, deben aportar su contribución.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GLOBAL DEFORESTATION: CONTRIBUTION TO ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE. G. M. Woodwell, J. E. Hobbie, R. A. Houghton, J. M. Melillo, B. Moore, B. J. Peterson y G. R. Shaver en *Science*, vol. 222, n.° 4628, págs. 1081-1086; 9 de diciembre de 1983.

THE FLUX OF CARBON FROM TERRESTRIAL ECOSYSTEMS TO THE ATMOSPHERE IN 1980 DUE TO CHANGES IN LAND USE: GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF THE GLOBAL FLUX. R. A. Houghton, R. D. Boone, J. R. Fruci, J. E. Hobbie, J. M. Melillo, C. A. Palm, B. J. Peterson, G. R. Shaver, G. M. Woodwell, B. Moore, D. L. Skole y N. Myers en *Tellus*, vol. 39B, n.os 1-2, págs. 122-139; febrero-abril, 1987.

GLOBAL TRENDS OF MEASURED SURFACE AIR TEMPERATURE. James Hansen y Sergej Lebedeff en *Journal of Geophysical Research*, vol. 92, n.° D11, págs. 13345-13372; 20 de noviembre de 1987.

El reloj de argón

La acumulación de argón en las rocas permite determinar la edad de las mismas, tengan éstas sólo 50.000 años o remonten su origen a la época de formación de la Tierra, la Luna y los meteoritos

Margarita López

Una de las características genuinamente humanas es la del reconocimiento del paso del tiempo. Conciencia que lleva al hombre a interrogarse por la edad de las cosas que le rodean y por sí mismo, por el origen de las montañas que quizá divisa desde la ventana de su casa, por el tiempo que lleva girando la Luna en torno a la Tierra y por múltiples cuestiones más de idéntico tenor. Pero tal vez más interesantes que las respuestas que se den a tales preguntas sean los métodos que el hombre ha ingeniado para responderlas.

A mediados del siglo pasado, por no volver la mirada más atrás, Lord Kelvin afirmaba que la Tierra no podía tener más de 100 millones de años. Calculó esa edad suponiendo un enfriamiento uniforme del planeta desde su formación. Sin embargo, el descubrimiento de la radiactividad en las postrimerías del siglo XIX vino a revolucionar los conceptos utilizados por Lord Kelvin. A principios de nuestro siglo se comprobó que la radiactividad natural de las rocas producía calor y, por consiguiente, no podía considerarse la Tierra un cuerpo en proceso de enfriamiento. La importancia del descubrimiento de la radiactividad no estribaba sólo en su poder generador de calor, sino que dotó también al hombre de una herramienta muy útil: un reloj natural.

Existen 92 elementos de ocurrencia natural. La mayoría de ellos constan de varios isótopos, es decir, de átomos del mismo elemento que poseen idéntico número de protones y distinto de neutrones; su masa es, pues, diferente. Por ejemplo, el oxígeno que respiramos está compuesto por 99,8 por ciento de O-16; el resto lo constituyen los isótopos de masa 17 y 18. La mayoría de los isótopos son estables; o sea, en las condiciones habituales de la Tierra pueden permanecer por siempre sin cambiar. Pero hay excepciones y algunos elementos tienen isótopos inestables. Estos isótopos se transforman espontáneamente en elementos diferentes por medio de la desintegración radiactiva. Vemos así que el uranio, U-235, se transforma en plomo, Pb-207; el potasio, K-40, que originariamente se presenta en estado sólido, se transforma en un gas noble, en argón, Ar-40; el rubidio, Rb-87, se transforma en estroncio, Sr-87. Cambios, todos ellos, que se producen acompañados de emisión de energía, ya sea en forma de partículas alfa o beta, o de radiación gamma.

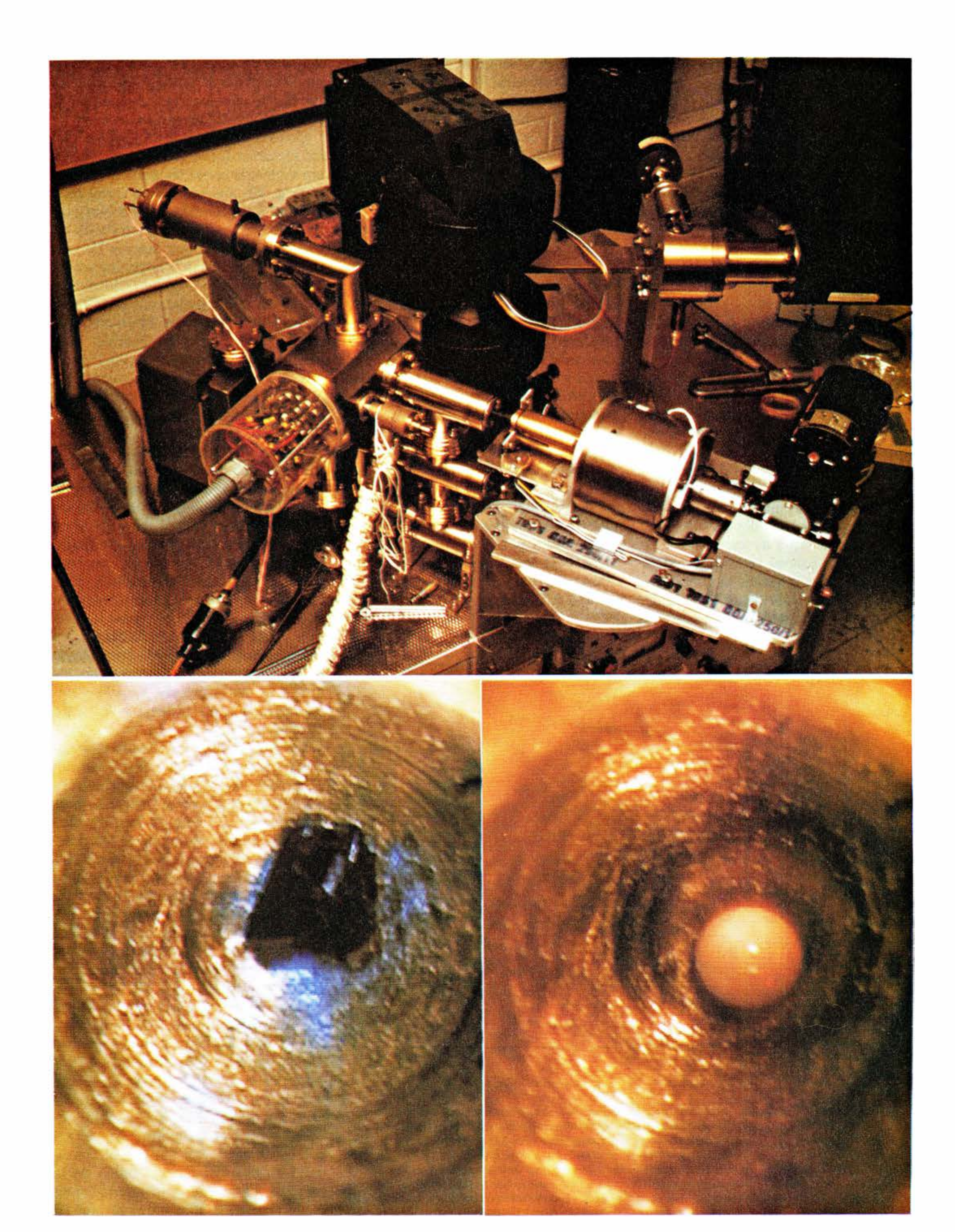
El fenómeno de la desintegración radiactiva se desarrolla a una velocidad que depende exclusivamente de la cantidad de átomos presentes en un momento dado. Lo entenderemos mejor recurriendo a la noción de vida media, que explicaremos a través de un ejemplo: si en un instante dado tenemos 100 átomos de un isótopo radiactivo, verbigracia de U-235, habrá de transcurrir 704 millones de años (la vida media de dicho isótopo) para que nos queden 50 átomos de U-235 y se generen otros 50 átomos de Pb-207; si dejamos que transcurra otra vida media (otros 704 millones de años), permanecerán sólo 25 átomos de U-235.

Abundando en el ejemplo, si al analizar una roca encontramos que tiene igual cantidad de U-235 que de Pb-207 sabremos que el tiempo transcurrido desde la formación de dicha roca es de 704 millones de años (una vida media) o que su edad se eleva a 1408 millones de años (dos vidas medias) si hallamos tres veces más plomo que uranio. Ahora bien, eso será cierto si podemos asegurar que la roca ha permanecido como *sistema cerrado*, es decir, que el cambio de concentración de U-235 y de Pb-207 obedece exclusivamente a la desintegración radiactiva; hemos de tener, pues, la certeza de que no había Pb-207 cuando se formó la roca o que podemos corregir los cálculos conociendo la cantidad inicial de éste.

Todos los métodos geocronológicos que se fundan en el empleo de radioisótopos siguen el principio expuesto de la vida media. Cada elemento posee la suya característica. La del carbono-14 se cifra en 0,00573 millones de años, por ejemplo; la del U-235, en 704 millones de años; la del potasio-40, en 1250; la del U-238, en 4468 millones de años, y la del rubidio-87 en 48.900 millones de años. Esos cinco casos nos ponen de manifiesto que los distintos relojes, o los distintos isótopos, poseen su propia cuerda o alcance. Lógicamente, se aplican a la medición cronométrica de distintos materiales; así, el C-14 se emplea para medir tiempos menores de 50.000 años, intervalo que abarca acontecimientos arqueológicos y antropológicos recientes. El Rb-87, en el extremo opuesto, nos permite evaluar episodios relacionados con la formación de nuestro planeta. Por su parte, el K-40 ofrece una amplia versatilidad de aplicación dentro de la escala geológica del tiempo. De éste nos vamos a ocupar inmediatamente.

En la naturaleza encontramos tres isótopos del potasio: K-39, K-40 y K-41. El primero y el tercero, estables, representan el 99,9 por ciento de la concentración de potasio en la naturaleza; el restante 0,01 por ciento es de potasio radiactivo, K-40. La mayor parte del potasio radiactivo (aproximadamente un 88,8 por ciento del mismo) se desintegra, mediante la emisión de una partícula beta, en calcio-40; el resto se desintegra en argón-40, principalmente por captura de un electrón,

MARGARITA LOPEZ se halla adscrita a la división de ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Se formó en la Universidad de Guanajuato, México, y se doctoró por la canadiense de Toronto, centro este último donde pasó, además, año y medio de investigación posdoctoral. Está preparando un laboratorio de geocronología por K-Ar en Ensenada.



1. APARATO Y MUESTRAS que se emplean en geocronología. Se trata, en primer lugar, de un espectrómetro de masas fabricado por Vacuum Generators®, modelo VG1200S (*arriba*). Este espectrómetro se ha utilizado con éxito para fechar, con el reloj de argón, granos individuales de mineral. Por muestra se ha tomado un grano de hornblenda: antes de ser fundido con el rayo láser (*abajo, a la izquierda*) y tras ser fundido con el rayo láser (*abajo, a la derecha*). Estas fotografías fueron tomadas en el Laboratorio de Geocronología por Ar^{40}/Ar^{39}, de la Universidad de Toronto. Cortesía de Chris M. Hall y Derek York.

aunque un pequeño porcentaje lo hace por emisión de un positrón.

Tenemos, pues, que el K-40 nos proporciona dos relojes: el potasio-calcio y el potasio-argón. El reloj K-Ca es muy difícil de utilizar por constituir el Ca-40 un isótopo natural muy abundante; y así resulta casi imperceptible, y por ende de medición ardua, el enriquecimiento de calcio-40 por desintegración de K-40. Por otro lado, el Ar-40 es un gas noble que, por su naturaleza, se encuentra en cantidades muy pequeñas en las rocas y permite una distinción relativamente fácil entre argón radiogénico (de origen radiactivo) y argón natural.

Para fechar una roca se mide la cantidad de isótopo paterno, K-40, y la cantidad de isótopo descendiente, Ar-40. A partir de esas concentraciones se infiere la edad. El problema inmediato que nos planteamos es el de averiguar si la edad calculada es representativa de la edad de formación de la roca. Para que así ocurra, deben converger tres premisas: que se cumpla con la condición de *sistema cerrado*, es decir, que el único cambio en la concentración de padre e hijo obedezca a la desintegración radiactiva; que se pueda determinar la cantidad de isótopo hijo atrapado durante la formación de la roca, y, por último, que las cantidades de padre e hijo puedan medirse con exactitud y sean representativas de la composición de la roca.

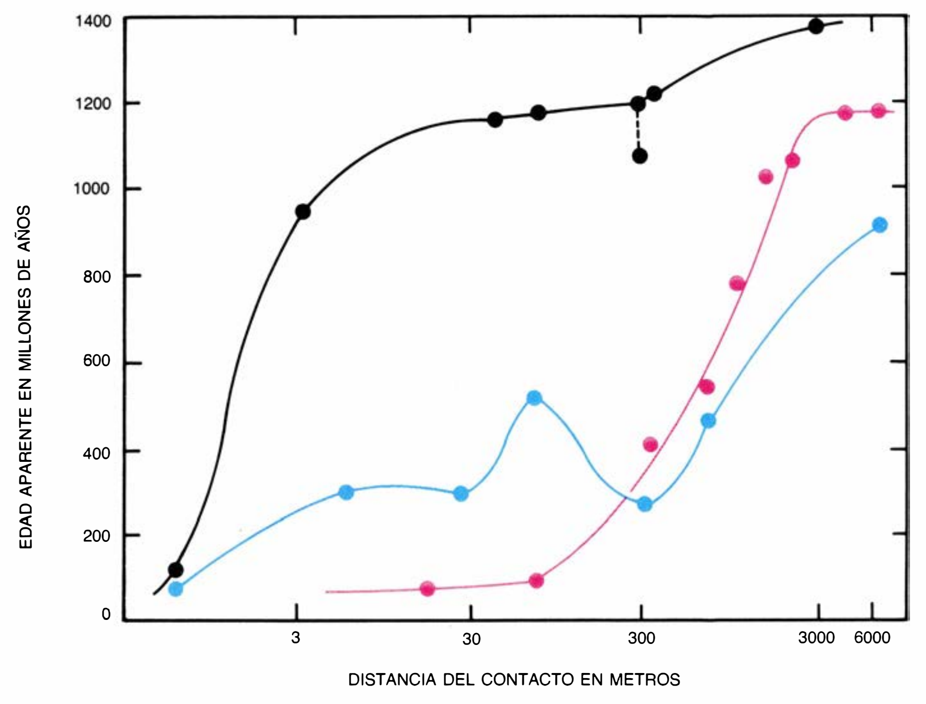
Pero, ¿a partir de qué momento se considera que ha nacido una roca? Dicho de otra manera: ¿de qué edad estamos hablando? Imaginemos lo que pasa en un volcán. Hasta justo antes de la erupción, la roca fundida o magma se encuentra en sus entrañas a muy alta temperatura, de suerte que el argón-40 que se está generando se escapa a la atmósfera. Durante la erupción, la lava es arrojada a la superficie, en donde se enfría y solidifica. Desde ese instante, el Ar-40 que se genere quedará atrapado en la roca dentro de la estructura cristalina de los minerales que la forman. Eso implica que, cuando fechamos una muestra de lava, estamos determinando la edad de erupción, o, mejor dicho, el momento en el que la lava alcanzó su *temperatura de bloqueo*, la temperatura por debajo de la cual el Ar-40 deja de escaparse. Ese momento define el instante cero: el reloj ha empezado a funcionar. No se detendrá. Seguirá funcionando durante muchos millones de años, hasta que la roca se funda en el laboratorio. La cantidad de Ar-40 que contenga nos revelará el secreto escondido de su edad.

Ocurre, sin embargo, que no todos los procesos formadores de rocas son tan violentos como las erupciones volcánicas. En algunos casos, existe roca fundida a profundidad que se enfría y cristaliza gradualmente. Se trata de los plutones, cuerpos que después de mucho tiempo alcanzan la superficie en un proceso que llega a durar varios millones de años. Estos plutones están constituidos por diferentes minerales, que poseen, naturalmente, distintas temperaturas de bloqueo. Podemos, pues, estudiar la historia del enfriamiento del plutón a través del análisis selectivo de los minerales que lo forman.

Los procesos de formación de rocas descritos en el ejemplo del volcán se llaman extrusivos, e intrusivos los relativos a los plutones. En ambos casos se forman rocas ígneas. Pero existe un tercer proceso que puede estudiarse con el sistema K-Ar y es el que concierne a las rocas metamórficas. Este proceso consiste en la transformación de una roca en otra por medio de presión y temperatura. Ya dijimos antes que la retención de Ar-40 es función de la temperatura; por consiguiente, los procesos metamórficos dejarán también su huella en el sistema K-Ar de los minerales.

Los minerales comúnmente empleados para fechamiento por el método del potasio-argón son muestras de roca completa, en lo que se refiere a rocas extrusivas. En el caso de rocas intrusivas y metamórficas que permitan la separación mecánica de los distintos minerales componentes, se analizan los que han mostrado retener bien el argón y una adecuada concentración de potasio. Así, los minerales habitualmente analizados son la hornblenda, biotita, muscovita, feldespatos de potasio, plagioclasas, etcétera.

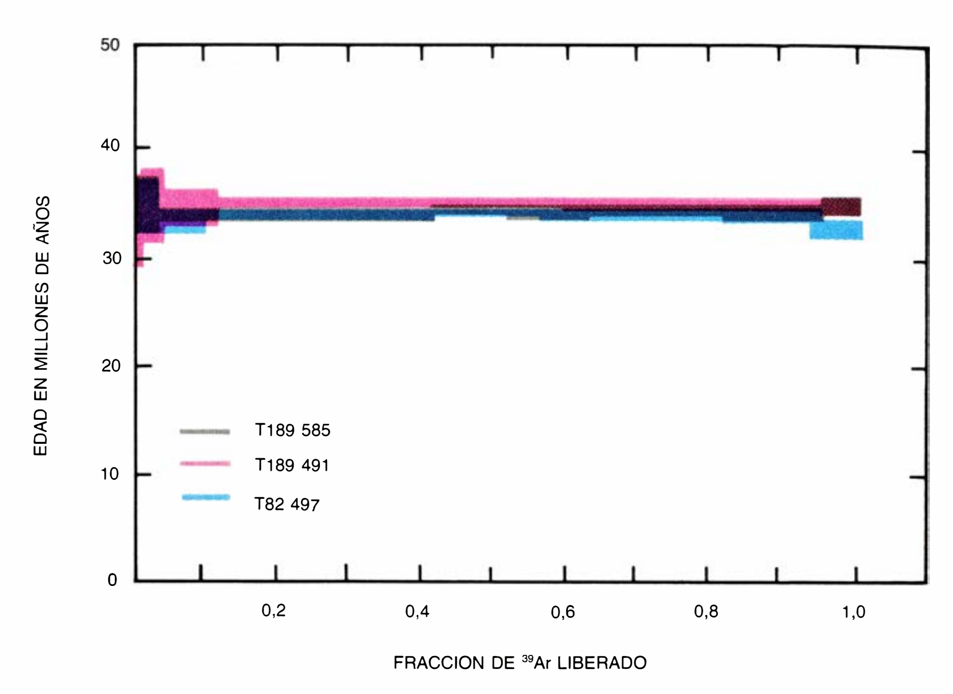
Generalmente, el análisis de potasio se realiza por fotometría de flama o absorción atómica. Para dicho examen se requiere que el K se encuentre en solución acuosa. Esto se logra disolviendo una parte representativa de la roca en diferentes ácidos. En cambio, recuérdese, a este propósito, que el argón es un gas noble que se halla atrapado en la estructura cristalina de la roca; para liberarlo es necesario calentar la muestra a altas temperaturas en un sistema de fusión evacuado al alto vacío. El gas obtenido se purifica antes de someterlo a su análisis por espectrometría de masas. Los resultados de K-



2. EDADES OBTENIDAS por el método tradicional del potasio-argón en muestras de hornblenda (*rojo*), biotita (*azul*) y feldespato de potasio (*gris*). Las muestras se recolectaron en la formación de los Manantiales de Idaho ("Idaho Springs"), que sufrió metamorfismo regional hace unos 1350 o 1400 millones de años; posteriormente, hizo intrusión en la misma un cuerpo circular conocido por Eldora. En 1964, S. R. Hart estudió las variaciones de las edades de la formación de los Manantiales de Idaho que el intrusivo Eldora había provocado. Con ese fin, se recogieron muestras del contacto con el cuerpo intrusivo y de distintos puntos alejados del mismo, hasta una distancia de 6000 metros. Como se infiere de la gráfica, la hornblenda es el mineral que retiene el argón con mayor fuerza; el feldespato de potasio muestra un comportamiento errático, amén de ser el mineral que sufrió la mayor pérdida de argón durante la intrusión de Eldora. A los 6000 metros de distancia de la zona de contacto, los feldespatos de contacto siguen mostrando una pérdida notable de argón. Las muestras de biotita tendían también a perder argón por culpa del cuerpo intrusivo. Hasta una distancia de 30 metros del contacto, las muestras de biotita perdieron todo su argón. Las propias muestras que se hallaban muy alejadas rindieron edades menores que la edad del metamorfismo regional.

40 (padre) y Ar-40 (hijo), deducidos independientemente, se combinan para calcular la edad de la roca.

Es evidente que una de las condiciones fundamentales de cualquier método geocronológico es que la roca tenga comportamiento de *sistema cerrado*. El cumplimiento de este requisito conducirá a la obtención de resultados concordantes cuando se empleen diferentes métodos de fechamiento. Las muestras que normalmente presentan este comportamiento y, por tanto, se consideran ideales son las tectitas. Estas rocas son producto del impacto de meteoritos en la superficie de la Tierra. La roca fundida en pequeñas gotas sale expulsada hacia la atmósfera, donde se congela inmediatamente y torna a caer en la superficie del planeta. Encierran, pues, una historia muy sencilla: se forman a altas temperaturas y su enfriamiento es instantáneo.



3. ESPECTROS DE EDAD de tres muestras de tectita mediante el empleo del método del argón-40/argón-39. Estos resultados sirven para demostrar el comportamiento ideal de una roca formada instantáneamente y que permanece luego sin perturbar. Los espectros fueron obtenidos por Richard Bottomley y Derek York con tecticas de Texas: bediasitas. Las edades registradas corroboran las señaladas con anterioridad por el método tradicional del potasio-argón; revelan, además, espectros absolutamente planos, característicos de muestras ideales. Esas mesetas perfectas, indicadoras de una historia geológica muy sencilla, no suelen darse fuera del ámbito de las tecticas. La mayoría de los espectros obtenidos con muestras terrestres que no han sufrido perturbación alguna que se sepa, suelen ofrecer edades más jóvenes en la parte inicial del espectro; ello puede obedecer a una pequeña pérdida de argón en sitios de débil retención de la estructura cristalina.

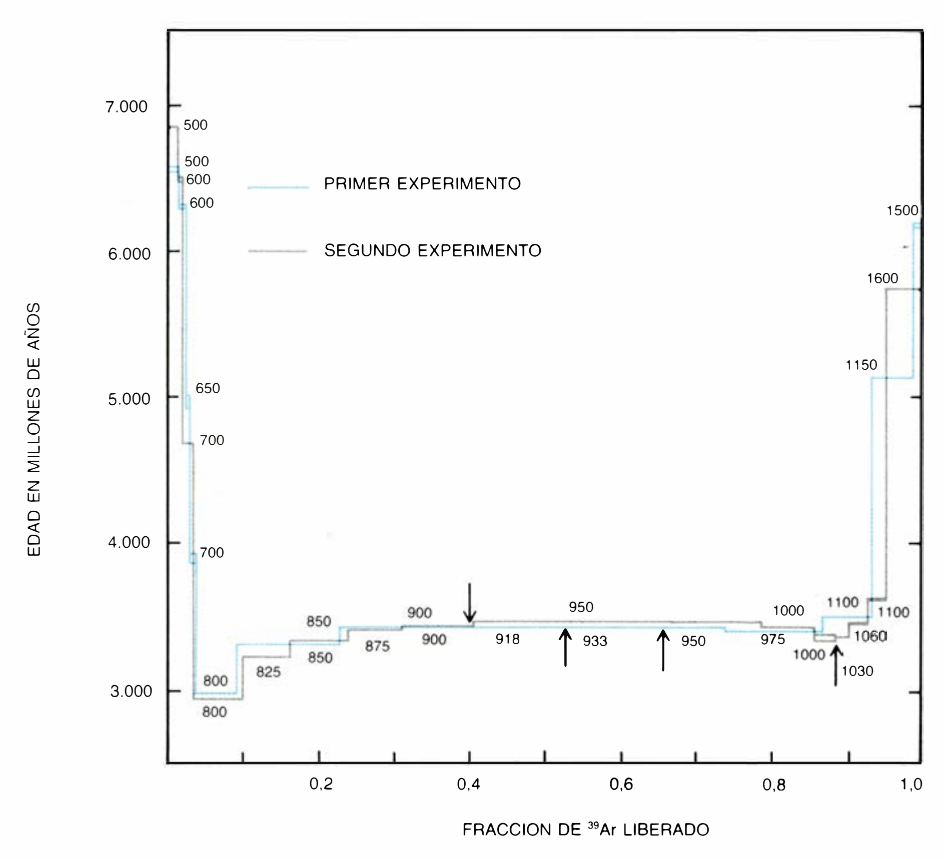
Lo ideal sería que los minerales que se deseen fechar por el método del potasio-argón hayan retenido todo el Ar radiogénico que se generó en virtud de la desintegración del K-40, desde su formación. No debieran contener, además, Ar-40 que no se genere *in situ*, es decir, no debieran adquirir argón de sus alrededores. Sépase, asimismo, que, tratándose de un gas noble y no formando enlaces con ningún otro átomo, el Ar puede perderse por difusión. Y ello ocurre siempre que la estructura cristalina no es capaz ya de retenerlo a presión atmosférica y bajas temperaturas; o cuando, después de su formación, el mineral sufrió una fusión parcial o total que produjo una nueva cristalización. El metamorfismo a altas presiones y temperaturas produce también pérdida de argón, ya sea total o parcial, según fuere la duración e intensidad del episodio metamórfico; asimismo, el calentamiento por enterramiento o metamorfismo de contacto causa la pérdida de argón en ciertos minerales sin que se observe ninguna modificación de las características físicas o químicas de la roca. Por último, el Ar puede difundirse por intemperismo o alteración de las rocas, ya que suscitan cambios en la composición química de éstas por la presencia de fluidos; alteración que podría incluso modificar la concentración de potasio.

Un ejemplo clásico del efecto de pérdida de Ar por metamorfismo de contacto fue presentado por S. R. Hart en 1964, en un estudio sobre la formación de los Manantiales de Idaho ("Idaho Springs"). Esta formación del Precámbrico sufrió metamorfismo regional hace 1400 millones de años; permaneció inalterada hasta la intrusión del *stock* Eldora, hace 55 millones de años. (El *stock* Eldora es un intrusivo ígneo de forma circular de unos tres kilómetros de diámetro; su composición es de cuarzo monzonita.) Con su trabajo, pretendía averiguar el grado de perturbación producido por el cuerpo intrusivo en función de la distancia. Para ello recogió muestras de rocas de la formación de los manantiales de Idaho, desde el punto de contacto con el intrusivo Eldora hasta una distancia de unos seis kilómetros. Se analizaron muestras de hornblenda, biotita y feldespato de potasio. Los resultados obtenidos se dividen en tres secciones en razón de los minerales estudiados.

De acuerdo con el examen de las muestras de hornblenda, es éste el mineral que mejor retiene el argón. Tan sólo la muestra que se tomó cerca del contacto perdió todo su argón y rindió una edad de 55 millones de años. La siguiente muestra, recogida a menos de tres metros del contacto del cuerpo intrusivo, ofrecía ya una edad de 1000 millones de años, lo que evidencia una alta capacidad de retención. La edad de las muestras de hornblenda aumenta progresivamente conforme nos alejamos del contacto. A los tres kilómetros, la edad del metamorfismo regional es de 1400 millones de años. Estas edades serían, pues, el registro que guardan estos minerales del metamorfismo regional. (Conviene tener claras las nociones de metamorfismo regional y metamorfismo de contacto. El metamorfismo de contacto ocurre en las aureolas de los intrusivos ígneos y consiste en la alteración de la roca encajonante por efecto del calor; este proceso se lleva a cabo a poca profundidad. En cambio, el metamorfismo regional ocurre en áreas extensas y es el producto de la combinación de altas presiones y temperaturas; en algunos casos incluye esfuerzo cortante; este metamorfismo se desarrolla a profundidad y promueve distintos grados de recristalización.)

Las muestras de biotita recabadas demostraron ser más propensas a la pérdida de Ar por efecto del calentamiento. Las propias muestras recogidas a 30 metros de distancia perdieron todo su argón, efecto que va disminuyendo gradualmente hasta que, a 4200 metros de distancia, las edades se estabilizan en 1200 millones de años, lo que indica todavía una pérdida considerable de Ar. Los feldespatos de potasio demostraron ser los minerales más sensibles del grupo analizado. Con un comportamiento errático, a los seis km de la zona de contacto aún manifestaban una mengua importante del gas noble.

De este estudio pueden extraerse varias conclusiones. En primer lugar, el metamorfismo de contacto ocasiona una pérdida sistemática de argón; se-



4. ESPECTRO DE EDAD de una muestra de basalto komatiítico (denominada KT-17B), obtenido por el método del argón-40/argón-39. La muestra se recogió en la formación Komati, que forma parte de la secuencia volcánica Onverwacht, en la región montañosa de Barbeton (Africa del Sur). En ambos experimentos se aprecia un exceso de argón, tanto por el característico espectro en forma de *U* como por las excesivas edades medidas en la parte inicial y final del espectro. La temperatura a la que se recogieron las fracciones de gas está indicada, en el primer experimento, en la parte superior, y en la inferior para el segundo experimento. A pesar de que la muestra contiene exceso de argón, se obtuvo una excelente meseta en la parte central del espectro. La edad de esta meseta se interpreta como la edad de metamorfismo de la formación.

gundo, bajo idénticas condiciones de presión y temperatura unos minerales retienen su argón más fuertemente que otros. De lo que se infiere que la fiabilidad de una edad obtenida por el método del potasio-argón dependerá de la capacidad de los minerales para retener este gas. Conocemos, asimismo, la propensión de algunos minerales a perder Ar, lo que en determinados casos conduce a subestimar la edad real, mientras que otros minerales tienden a adquirir argón de sus alrededores, acumulando un exceso de argón que induce a atribuirles una edad exagerada. Ello obliga, pues, a escoger con sumo cuidado las muestras para no caer en ninguna de las dos fuentes de errores. Aun así habrá situaciones de imposible solución por la incapacidad del método para distinguir entre Ar radiogénico y exceso de argón, o cuando una muestra sufrió pérdida de Ar en su pasado. Mas, para nuestra fortuna, esas dificultades se superan aplicando el método del argón-40/argón-39, que describimos a continuación.

Craig Merrihue y Grenville Turner, investigadores del departamento de física de la Universidad de California en Berkeley, publicaron en 1966 un artículo que constituye el acta de nacimiento del método del Ar-40/Ar-39. Se fundaban en el siguiente hecho: la irradiación de potasio-39, el isótopo estable más abundante del potasio, con neutrones rápidos producía argón-39. E hicieron notar que ese procedimiento aportaba una nueva forma de medir la concentración de potasio en la roca, ya que el Ar-39 producido en el reactor era directamente proporcional a la cantidad de K presente. Por consiguiente, se podía medir la concentración de Ar-39 por espectrometría de masas durante el mismo experimento en que se determinara el Ar-40.

La posibilidad de medir ambos isótopos simultáneamente presenta varias ventajas. Veamos una importante. En el método del potasio-argón, se mide, durante el análisis de K por fotometría de llama, la concentración total de dicho elemento. Débese, pues, extraer todo el Ar atrapado en la roca para así obtener la mejor estimación posible de la concentración de Ar radiogénico total. Según indicamos antes, este tipo de análisis no nos permite distinguir entre muestras que hayan sufrido pérdida o ganancia de Ar a lo largo de su historia. Pero el método del Ar-40/Ar-39 permite resolver el problema al aplicar la *técnica de calentamiento por pasos*. Porque ambos isótopos pueden determinarse simultáneamente, cabe extraer el gas en diferentes fracciones mediante el incremento gradual de la temperatura. Estas fracciones se analizan individualmente en el espectrómetro de masas y se calcula la edad de cada una de ellas. A medida que vamos obteniendo las edades, las vamos plasmando en una gráfica de coordenadas cartesianas en función de la temperatura o, más comúnmente, en función del porcentaje de Ar-39 liberado. Diremos que una muestra manifiesta un comportamiento ideal —a saber, sin pérdida ni ganancia de argón— cuando las diferentes fracciones obtenidas revelen la misma edad. Según era de esperar, las tectitas muestran un comportamiento ideal y las edades de sus diferentes fracciones forman una línea recta.

Las rocas y minerales en general tienen un comportamiento alejado del ideal porque han sufrido, en mayor o menor grado, pérdidas o ganancias de argón. Marvin A. Lanphere y G. Brent Dalrymple, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, publicaron en 1971 los resultados obtenidos en rocas y minerales terrestres de los que se conocía su historia geológica por otros cauces. Las muestras analizadas habían sufrido un calentamiento posterior a su cristalización. Pretendían, en su estudio, determinar si la aplicación de la *técnica de calentamiento por pasos* permitía o no recuperar la edad de cristalización de tales muestras, que evidentemente habían perdido argón según se desprendía de las edades anormalmente jóvenes logradas al aplicar el método convencional del K-Ar. Siguieron el modelo teórico diseñado por G. Turner en 1968; de acuerdo con el mismo, a través de la forma de los espectros se estima la edad de cristalización, la edad de recalentamiento y la cantidad de argón perdido. Lanphere y Dalrympe observaron en sus espectros que la edad máxima obtenida a altas temperaturas constituía, en efecto, una estimación razonable del valor mínimo para la edad de cristalización, en tanto que el mínimo del espectro de edad señalaba una buena estimación de la misma edad para el episodio de calentamiento. Se confirmaba así la utilidad de la *técnica de calentamiento por pasos* para dilucidar historias geológicas completas.

En el examen de muestras cuya geología revela que no han sufrido pertur-

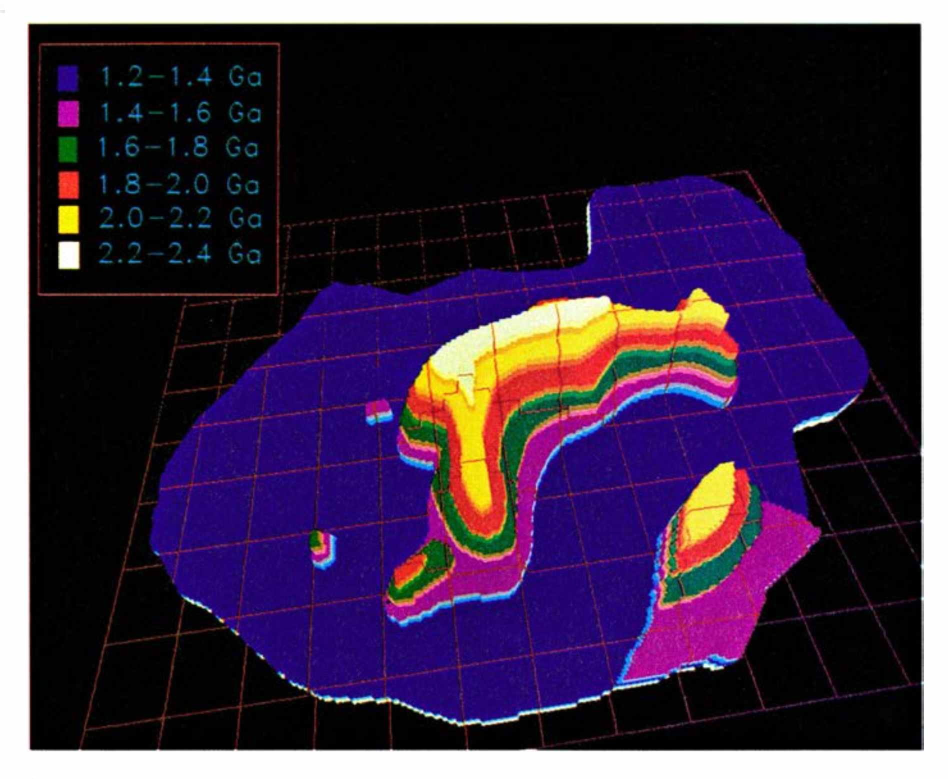
bación, los espectros de edad dibujan mesetas muy claras. En 1974, Dalrymple y Lanphere relacionaron esas mesetas con la edad de cristalización o enfriamiento; argumentaron que podrían servir de criterio para distinguir las rocas y los minerales no afectados por perturbaciones de los que sí las habrían sufrido.

La *técnica de calentamiento por pasos* se aplicó también a rocas ígneas, cuyas edades inferidas por el método del potasio-argón resultaban excesivamente altas, lo que inducía a pensar en un exceso de argón. Los espectros de edad obtenidos en estas rocas tienen forma de *U*, cuya base se aproxima, en estos espectros, a la edad de cristalización o coincide con ella. Apoyándose en ese dato, Lanphere y Dalrymple sugirieron que, para rocas y minerales ígneos, el espectro de edad en forma de *U* remitía a un exceso de argón, y, a menos que hubiera pruebas en sentido contrario, el mínimo de edad del espectro habría que atribuirlo a la máxima estimación de la edad de enfriamiento. Rocas y minerales metamórficos que contienen argón en exceso no siempre revelan espectros en forma de *U*; antes bien, pueden mostrar espectros escalonados donde la edad aumenta progresivamente; en casos especiales se ha encontrado que el excedente de argón llega a saturar el mineral, que, al ser analizado, rinde espectros planos (falsas mesetas) que carecen de significado geológico.

La importancia del método de fechamiento por el sistema potasio-argón puede medirse a través de las múltiples aplicaciones en dominios muy dispares de la ciencia. Los pioneros del paleomagnetismo descubrieron que, al analizar una pila de varios derrames horizontales de lava, algunos de ellos se encontraban magnetizados en una dirección, mientras que otros lo estaban en la antípoda. El fenómeno podía explicarse de dos maneras: la polaridad del campo magnético se invertía de vez en cuando y los derrames de lava contenían el registro de esas inversiones o bien, como interpretación alternativa, los derrames de lava adquirían magnetización en dirección opuesta al campo geomagnético.

Los científicos se dividieron y se adscribieron a uno u otro bando. La solución vendría dada, empero, por Allan Cox, Richard Doell, Brent Dalrymple e Ian MacDougall tras analizar derrames de lava procedentes de distintas partes del globo. Propusieron lo siguiente: si el campo magnético se invierte de vez en cuando, al analizar muestras de diferentes partes debería recogerse registros de inversión magnética idénticos para cualquier parte del mundo, habida cuenta de que la inversión geomagnética es un fenómeno global. Pero si las inversiones magnéticas observadas en las lavas obedecían a peculiaridades de las muestras recogidas, entonces las inversiones no tendrían por qué presentar ninguna correlación temporal para distintas partes del mundo. Los resultados fueron sorprendentes: al agrupar por edades las muestras de magnetización normal e inversa se advirtió un patrón característico y se estableció así la escala de inversiones geomagnéticas. El método de fechamiento por el sistema potasio-argón representó un hito fundamental en el establecimiento de dicha escala de inversiones.

La relevancia de este descubrimiento se hace más notoria cuando pensamos en el peso que tuvo en la corroboración de la teoría de la deriva continental. La observación de los márgenes continentales de América del Sur y de Africa nos mueve a imaginarlos formando parte de un rompecabezas gigante, ahora separados pero antaño verosímilmente unidos. En los años de la segunda guerra mundial se hizo un registro del magnetismo oceánico con la finalidad de descubrir la presencia de submarinos enemigos. Terminada la contienda, el examen de todos esos registros magnéticos permitió descubrir que mostraban un patrón de magnetización bandeado. En una banda se observaba magnetización en dirección normal, mientras que la banda contigua revelaba magnetización en dirección opuesta. Este patrón de magnetización se forma cuando la roca fundida producida en las crestas del fondo oceánico adquiere, al enfriarse, la dirección prevalente del campo geomagnético; posteriormente, ese material es empujado para dar cabida a una nueva emisión de lava, y así va alejándose paulatinamente de la cresta. Este proceso se desarrolla sin solución de continuidad; de esa manera, las lavas del fondo del océano generan un patrón de magnetización bandeado, que resulta simétrico porque esta lava se deposita simultáneamente a ambos lados de la cresta y, en consecuencia, su eje de simetría coincide con ésta. En el océano Atlántico, el eje de simetría se encontraba aproximadamente por la mitad y coincidía con un rasgo topográfico preeminente: la dorsal centro-oceánica. Al integrar esos conocimientos con la escala de inversiones geomagnéticas se comprobó que, hace unos 200 millones de años, América del Sur y Africa eran un supercontinente. Así nació la teoría de la tectónica de placas.



5. REPRESENTACION TRIDIMENSIONAL DE LAS VARIACIONES DE EDAD, observadas en una hojuela de flogopita. Se extrajo ésta de un xenolito embebido en una kimberlita. Esta mica, de composición química uniforme, tiene 1,5 milímetros de ancho por 2,5 milímetros de largo. Se analizó el argón liberado de 75 diminutos pozos perforados en la mica con un rayo láser. Las edades obtenidas en los márgenes de la hojuela corresponden a la edad de emplazamiento de la kimberlita, mientras que se evidencia la presencia de exceso de argón hacia el centro de la hojuela como lo indican las excesivas edades obtenidas. Esta foto fue tomada por Tullis C. Onstott, de la Universidad de Princeton, con cuyo permiso la publicamos aquí.

A

B

2,58
2,65
2,64
2,53
2,60
2,63 ± 0,02
2,55
2,58
2,63
2,63
2,58
2,63
2,52
2,63
2,58
2,62
2,63
2,51
2,63
2,63
2,62

DISTINTAS EDADES
DE LA BIOTITA

$\geqslant$ 2,66
2,63-2,65
2,60-2,62
2,57-2,59
2,54-2,56
$\leqslant$ 2,53

Los inicios de la teoría de la tectónica de placas se apoyaban en el registro de inversiones geomagnéticas del fondo del océano. Por desgracia, no hay corteza oceánica que tenga más de 200 millones de años, lo que significa que la historia de la deriva continental, de la que da fe el suelo del océano, representa sólo una fracción en la vida de nuestro planeta. Para estudiar episodios de deriva continental más antiguos es necesario recurrir al registro paleomagnético de rocas continentales, que nos permite entender la acreción de los continentes a partir de islotes de corteza estable (protocontinentes). El registro magnético de algunas rocas precámbricas se comporta como si fuera una cámara que va tomando fotografías de su recorrido y facilita así la reconstrucción de su viaje. Ahora bien, estas reconstrucciones deben fecharse cuidadosamente. El método de K-Ar interviene entonces por ser el más adecuado, ya que el registro geocronológico y el paleomagnético son susceptibles a los cambios de temperatura.

Muchos de los rasgos topográficos que vemos surgieron durante colisiones entre protocontinentes; tal es el caso de Los Himalayas. Se propuso un origen similar para la orogenia del Grenville, en el escudo canadiense. Estudios paleomagnéticos del gabro Córdova, en Ontario, contenían el paleopolo denominado "C", que se creía era el registro de dicha colisión; sin embargo, los resultados geocronológicos obtenidos por la autora indican que el paleopolo "C" se adquirió durante un episodio metamórfico muy leve ocurrido mucho después de la orogenia del Grenville.

En ese contexto, las investigaciones paleomagnéticas indican que, hace 140 millones de años, la península de Baja California se encontraba aproximadamente frente a las costas del sur de México; se espera que un estudio geocronológico detallado nos permita apoyar o descartar tal hipótesis.

Vayamos con otra aplicación del método del K-Ar. Continuamente hay que fechar rocas que contienen el registro del desenvolvimiento del campo geomagnético para lograr entender mejor ese fenómeno y confeccionar una lista de inversiones geomagnéticas lo más precisa posible. El episodio de Laschamp es un proceso de inversión geomagnética reciente muy bien documentado. C. M. Hall y Derek York, de la Universidad de Toronto, aplicaron al mismo el método del Ar-40/Ar-39 y llegaron a la conclusión, en 1976, de que el episodio de Laschamp debió ocurrir hace 47.000 años. Quedó así demostrado que el rango de aplicación de esta técnica se extendía hasta el ámbito de acción del método del carbono-14.

Durante mi estancia en el laboratorio del profesor York, aplicamos con éxito la técnica del Ar-40/Ar-39 al estudio de rocas ultramáficas (komatiitas) del yacimiento sudafricano de Barberton. Obtuvimos entonces la edad fiable de mayor antigüedad alcanzada por ese sistema, en rocas terrestres: 3450 millones de años. Varios son los motivos que justificaron el estudio de la secuencia komatiítica de Barberton: el interés que han despertado los derrames de lava ultramáfica que sólo se presentan en la historia temprana de la formación de la Tierra; además, asociadas a esta formación se encuentran unas capas de sedimentos en los que se descubrieron microfósiles de algas, los cuales representan la forma de vida más antigua de que se tenga registro en nuestro planeta, lo que, a su vez, nos conduce a pensar que el inicio de la vida en la Tierra ocurrió en una época muy temprana de la misma y bastante próxima a su consolidación, hace unos 4500 millones de años.

Avancemos miles de años hacia el presente y consideremos la aplicación del método Ar-40/Ar-39 al estudio de la evolución de la humanidad. A finales de 1974, D. C. Johanson y su equipo descubrían en Etiopía *Lucy*, una hembra de *Australopithecus afarensis*; se trata de un hallazgo clave para entender la evolución del hombre. Para Johanson, *Lucy* constituiría el ancestro común de todos los homínidos (género *Australopithecus* y género *Homo*). Otros antropólogos, en particular R. E. Leakey, están en desacuerdo y sostienen que todos los homínidos, incluido *Lucy*, comparten un ancestro común todavía por descubrir. En el debate importa sobremanera conocer con exactitud la edad de *Lucy*, pues el hallazgo de un *Homo* anterior resolvería la disyuntiva.

Los fósiles de ese tipo se datan por correlación estratigráfica con derrames volcánicos que se encuentren en el estrato inmediatamente superior y en el inmediatamente inferior al del fósil. Por ejemplo, *Lucy* se desenterró a 60 metros por debajo de una toba piroclástica (identificada con la expresión técnica BKT-2u). James L. Aronson y su grupo, de la Universidad de Case Western Reserve, fecharon por el método del potasio-argón la toba BKT-2u y dedujeron una edad de 2,6 millones de años; para un derrame basáltico correlacionado con una sección que se encuentra por debajo mismo de *Lucy* obtuvieron una edad de 3,0 millones de años. Posteriormente, Derek York y Chris Hall cifraron, por el método del argón-40/argón-39, la edad de la toba BKT-2u en 3,1 millones de años. ¿Por qué tamaña discrepancia en la datación? En opinión de York y Hall, cabría atribuirla a la dificultad de extraer la totalidad del argón de muestras de feldespato, lo que conduce a la obtención de edades anómalamente jóvenes al aplicarles el método del K-Ar. Si aceptamos la edad aducida por York y Hall, *Lucy* habría vivido hace más de 3,1 millones de años. Pero esa fecha no acaba de aceptarse del todo porque está en desacuerdo con otros resultados paleomagnéticos. Las razones de esa discrepancia pueden ser varias: contaminación de la toba piroclástica con otro material más antiguo, que dé lugar a edades excesivas mientras que la remagnetización posterior de estos derrames sería la fuente de error de los resultados paleomagnéticos. El análisis de una nueva colección de muestras por ambos métodos quizá resuelva el dilema; en el ínterin *Lucy* se resiste a decirnos su edad.

Una de las líneas más prometedoras de aplicación del método del argón-40/argón-39 comenzó en 1973, cuando G. H. Megrue, del Observatorio Smithsoniano en Massachusetts, fechó muestras de la Brecha Lunar 14301 (compuesta de clastos de plagioclasa, norita y fragmentos de vidrio en una matriz de grano fino), utilizando un rayo láser de operación pulsante para fundir y analizar individualmente pequeños fragmentos de los clastos y matriz. La misma técnica fue aplicada por O. A. Shaeffer y su grupo, de la Universidad estatal de Nueva York, para fechar muestras de Basalto Lunar 15067 y de la Brecha Lunar 15465. Ambos grupos, el de Megrue y el de Shaeffer, obtuvieron sus resultados mediante la fusión total de pequeños fragmentos de muestra, lo que equivalía a un fechamiento por el potasio-argón convencional. Pero ya hemos dicho que uno de los aspectos de mayor interés del método del argón-40/argón-39 radica en su capacidad de generar espectros de edad a través de la aplicación

6. HOJUELA DE BIOTITA del batolito del lago Hammel, en la provincia superior del escudo canadiense (*arriba*). En la biotita se distinguen con nitidez los pozos perforados por el rayo láser. Se analizó el argón liberado en cada zona con el espectrómetro de masas VG 1200®, del departamento de física de la Universidad de Toronto, a cargo del profesor Derek York. Las edades obtenidas por el método del argón-40/argón-39 para cada pozo señalan las variaciones en las edades obtenidas en el interior de un mismo cristal (*abajo*). (Fotografías cedidas por C. M. Hall.)

de la *técnica de calentamiento por pasos*. Derek York y su grupo de Toronto lograron en 1981 el primer espectro utilizando un rayo láser de operación continua. A partir de entonces dio comienzo la era del láser en geocronología.

El uso de rayos láser para fundir muestras se ha generalizado y ha traído una nueva dimensión al método de argón-40/argón-39. Para estudiar la distribución de argón en el interior de la estructura cristalina de los minerales y lograr así una mejor interpretación de las edades obtenidas hubo que minimizar la fracción de muestra analizada. Puesto que el rayo láser permitía ya fundir porciones diminutas de muestra, el siguiente reto consistió en mejorar la sensibilidad de los espectrómetros de masas existentes. La compañía Vacuum Generators lo consiguió al producir un espectrómetro de masas de alta sensibilidad. Con ese aparato se pudo fechar granos sueltos de tefra cuaternaria (de edad inferior a un millón de años), trabajo del que dieron cuenta, en 1987, Paul Von der Bogaard y sus colaboradores de la Universidad del Kuhr y de Toronto. Siguiendo esta misma línea de investigación, Paul Layer y colaboradores, de la Universidad de Toronto, obtuvieron espectros de edad en granos sueltos de hornblenda y biotita precámbricas.

El rayo láser de operación continua se ha empleado también como microsonda para fundir y fechar pequeñas porciones de la muestra. Con un rayo láser muy fino se producen pozos de 80-150 micrometros de diámetro y de 50 a 100 micrometros de profundidad, lo que posibilita la obtención de decenas de edades en pequeñas porciones de muestra. Esto permitirá conocer la distribución de argón dentro de la estructura cristalina de los minerales y así entender mejor el mecanismo de pérdida o ganancia de argón.

En el estudio realizado por T. C. Onstott y D. Phillips, de la Universidad de Princeton, se perforaron, mediante un rayo láser, 75 pozos en la superficie de una hojuela de flogopita de 2,5 milímetros de largo por 1,5 milímetros de ancho. Muestra de flogopita que se había extraído del núcleo de un xenolito de una kimberlita. El argón liberado en cada pozo se analizó por espectrometría de masas. Las edades obtenidas en el margen de la hojuela indican la edad de emplazamiento de la kimberlita; hacia el centro de la hojuela, se obtienen edades de 2400 millones de años, que revelan un exceso de argón. Según Onstott y Phillips este argón en exceso pudo haberse incorporado en el xenolito al equilibrarse con argón del manto, durante o justo antes de la erupción de la kimberlita. Importa advertir que el análisis minucioso recogido en este estudio no sólo permitió detectar la presencia de exceso de argón, sino que posibilitó, además, su localización en el centro de la hojuela. Chris M. Hall y colaboradores han observado pequeñas variaciones en las edades obtenidas dentro de una sola hojuela de biotita. Estos resultados revisten especial interés: esa misma muestra rindió un espectro de edad casi plano, cuando se analizó en forma tradicional mediante la técnica de calentamiento por pasos utilizando varios miligramos de muestra. Los autores sugieren que la interpretación de esta discrepancia aguarda la obtención de más datos.

Vemos, pues, el progresivo refinamiento del método de Ar-40/Ar-39 desde que Merrihue y Turner propusieron, en 1966, la irradiación de muestras para obtener una forma alternativa a la medición del potasio-40 a través del Ar-39. Esta innovación abarca aspectos experimentales y de interpretación de edades. Se dio un gran paso con el empleo del rayo láser para fundir las muestras. El uso del láser en geocronología proporcionó el medio para fundir porciones diminutas de muestra (del orden de 100 micrometros), abriendo una nueva dimensión al método argón-40/argón-39. Se espera que en el futuro esta modalidad de fechamiento generalice su uso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OLDEST RELIABLE Ar^{40}/Ar^{39} AGES FOR TERRESTRIAL ROCKS: BARBERTON MOUNTAIN KOMATIITES. Margarita López Martínez, Derek York, Chris M. Hall y John A. Hanes, en *Nature*, vol. 307, n.° 5949, págs. 352-354; enero de 1984.

THE DERIVATION OF Ar^{40}/Ar^{39} AGE SPECTRA OF SINGLE GRAINS OF HORNBLENDE AND BIOTITE BY LASER STEP-HEATING. Paul W. Layer, Chris M. Hall y Derek York, en *Geophysical Research Letters*, vol. 14, n.° 7, págs. 757-760; julio de 1987.

Ar^{40}/Ar^{39} LASER DATING OF SINGLE GRAINS: AGES OF QUATERNARY TEPHRA FROM THE EAST EIFEL VOLCANIC FIELD, FRG. Paul V. D. Bogaard, Chris M. Hall, Hans-Ulrich Schmincke y Derek York, en *Geophysical Research Letters*, vol. 14, n.° 12, págs. 1211-1214; diciembre de 1987.

ARGON ISOTOPIC ZONING IN MANTLE PHLOGOPITE. Phillips y Tullis C. Onstott, en *Geology*, vol. 16, n.° 14, págs. 542-546, 1988.

Ar^{40}/Ar^{39} AGES FROM A FULLY AUTOMATED LASER MICROPROBE. Chris M. Hall, David Redman, Paul W. Layer y Derek York, en *EOS Transactions, American Geophysical Union*, vol. 69, n.° 16, pág. 520; abril de 1988.

Interferencias cuánticas y efecto Aharonov-Bohm

Estos sorprendentes efectos desempeñan un importante papel en la teoría de las interacciones electromagnéticas, en la física del estado sólido y, posiblemente, en el desarrollo de nuevos dispositivos microelectrónicos

Yoseph Imry y Richard A. Webb

Aunque la teoría cuántica tendrá pronto un siglo de vida, su capacidad para proporcionar nuevos conocimientos acerca de la naturaleza de la materia se ha mantenido inagotada. Una de las sorpresas aportadas por esta teoría tiene su origen en un ensayo llevado a cabo por Yakir Aharonov y David Bohm, en 1959. De acuerdo con su propia indicación, imaginemos un imán apantallado, de suerte que no pueda ejercer fuerza alguna sobre otro imán situado en sus proximidades. En otras palabras, no se podría detectar ninguna manifestación convencional del campo originado por el imán apantallado. En estas condiciones, Aharonov y Bohm predijeron que, si un haz de electrones pasara cerca de dicho imán apantallado, la fase de la función de ondas de los electrones cambiaría. (En el marco de la teoría cuántica, un electrón se puede describir en ocasiones como una onda y en ocasiones como una partícula.)

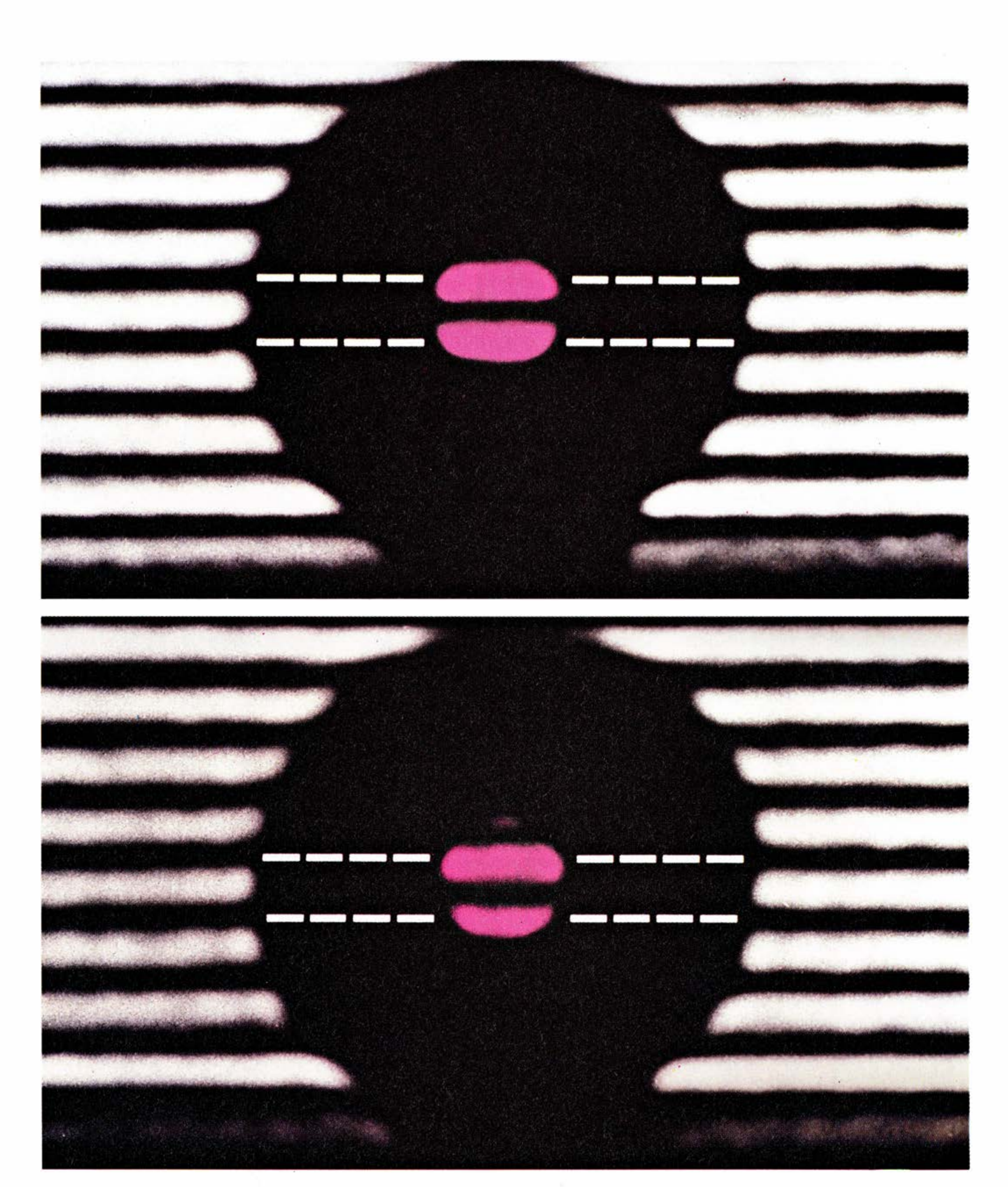
¿Cómo explicar el cambio de fase de la función de ondas de los electrones? Aharonov y Bohm predijeron que este efecto debíase a una entidad física más fundamental que los campos eléctricos y magnéticos: un potencial, una magnitud cuyo cambio en el espacio y en el tiempo proporciona los campos eléctricos y magnéticos. Tres décadas más tarde, el efecto Aharonov-Bohm ha recibido confirmación concluyente en distintos experimentos realizados con electrones que se movían en el vacío; en los últimos cuatro años, este efecto se ha observado también en pequeños cables conductores a bajas temperaturas.

El efecto Aharonov-Bohm ha ejercido un gran peso en la forma en que los físicos se han planteado la electrodinámica. Desde hace mucho tiempo se sabe que, cuando una carga positiva pasa junto a una carga negativa en reposo, sin llegar a colisionar con ella, resulta acelerada y cambia de dirección. Para explicar este fenómeno, conocido como acción a distancia, Michael Faraday propuso, en 1846, que las cargas originan campos que ejercen fuerzas eléctricas y magnéticas. A la luz de lo que se conocía en aquella época, los campos eran capaces de describir la dinámica entera de las cargas. Cuando se formularon las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica, fueron los potenciales, y no los campos, los que aparecieron en las ecuaciones de la segunda, mientras que los de la relatividad se simplificaban, en una expresión matemática compacta, cuando los campos se expresaban en forma de potenciales. Los experimentos sugeridos por Aharonov y Bohm revelaban la significación física de los potenciales: cuando una partícula pasa junto a un campo eléctrico o magnético, aunque sin interaccionar con él, su dinámica resultará alterada en una cuantía pequeña, mensurable. El efecto Aharonov-Bohm indica que son los potenciales, y no los campos, los que actúan directamente sobre las cargas.

Los físicos han venido explorando las implicaciones generales de este efecto en materias que van desde el efecto Hall cuantizado hasta la teoría de las supercuerdas, pasando por la superconductividad. En los próximos años, el efecto Aharonov-Bohm podría dejarse sentir, de una manera poderosa, en la electrónica. A finales de este siglo, los industriales esperan producir pastillas de silicio ("chips") de un centímetro cuadrado que contengan hasta 100 millones de componentes. Si este número se alcanza, o incluso se supera, habrá que poner en explotación un nuevo haz de principios físicos. El efecto Aharonov-Bohm podría abrir las puertas a las nuevas tecnologías.

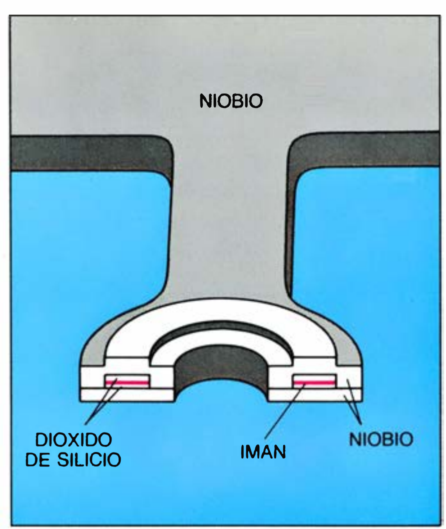
Los experimentos de interferencia con dos rendijas, que ofrecen una demostración elegante de la naturaleza ondulatoria de los electrones, aportan la base para comprender el efecto Aharonov-Bohm. En uno de esos experimentos, un generador de partículas emite un haz de electrones, dotados todos de la misma energía. El haz se dirige hacia una placa que absorbe electrones. En esta placa se han abierto dos rendijas verticales y finas poco separadas entre sí. Estas dos rendijas están situadas precisamente a la derecha y a la izquierda del punto sobre el que incide el haz. Centrada en la parte posterior de las rendijas, se ha colocado una película sobre la que se forma un punto brillante cada vez que un electrón incide sobre ella. Cuando el generador de partículas ha emitido ya muchos electrones, se observa sobre la película una secuencia de bandas claras y oscuras, dispuestas paralelamente a las rendijas mencionadas. En el centro de la serie se encuentra una banda clara que se difumina a uno y otro lado, para dar lugar a dos bandas oscuras. Estas bandas están flanqueadas a su vez por

YOSEPH IMRY y RICHARD A. WEBB están a la cabeza de las investigaciones teóricas y experimentales sobre el efecto Aharonov-Bohm. Imry enseña física en el Instituto Weizmann de Ciencias, donde se doctoró en 1966. Webb dirige el grupo de fenómenos cuánticos a bajas temperaturas en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de la empresa IBM, en Yorktown Heights, Nueva York. Obtuvo su título de doctor en el año 1973, en la Universidad de California en San Diego.



1. FIGURAS DE INTERFERENCIA y su demostración del efecto Aharonov-Bohm. Una parte de un haz de electrones atraviesa un imán de forma toroidal (*anillo negro situado en la imagen superior*) recubierto de niobio. La otra parte del haz pasa por fuera del toroide. La unión de estos dos haces produce una figura de interferencia (*región en color de la imagen superior*). La figura de interferencia de fondo que se produce fuera del anillo resulta de la interferencia de los electrones que no atraviesan el toroide. La figura de interferencia enmarcada por el toroide aparece desplazada con respecto a la figura de fondo, incluso en el caso en que los electrones se apantallaran del campo magnético. El apantallamiento se produce porque el niobio se enfría a una temperatura de 9,1 grados Kelvin y se convierte en superconductor. De acuerdo con las predicciones de Yakir Aharonov y David Bohm, el desplazamiento citado se produce en virtud de la interacción entre las ondas de los electrones y el potencial vector, que está presente incluso en ausencia del campo magnético. Cuando el revestimiento de niobio se calienta por encima de 9,1 grados Kelvin (*abajo*), este material deja de ser superconductor, el campo magnético contenido en el interior del imán toroidal cambia y la figura de interferencia se desplaza bruscamente (*rojo, abajo*). Akira Tonomura y sus colaboradores realizaron este experimento en 1986.





2. IMAN TOROIDAL y película de niobio utilizados en los experimentos de Tonomura, recogidos en la fotografía y en el dibujo. El imán, de cinco micras de espesor, está constituido por una aleación que contiene el 83 % de níquel y el 17 % de hierro. Un revestimiento de dióxido de silicio aísla al imán del niobio.

otras bandas claras, y así sucesivamente [*véase la figura 3*].

¿Cómo pueden los electrones producir esta figura? Si los electrones fueran proyectiles, rebotarían en las rendijas o pasarían a través de ellas. En consecuencia, la película registraría una concentración de impactos directamente detrás de las rendijas; a uno y otro lado de este grupo habría pocos impactos. Pero es obvio que ese efecto no da cuenta de la figura compleja que se observa en la realidad.

Una explicación mejor (y que coincide con el comportamiento que la teoría cuántica atribuye a los electrones) se basa en la atribución de un comportamiento ondulatorio a las partículas. La propiedad que caracteriza a las ondas cuando avanzan en el espacio y en el tiempo es la amplitud, que varía periódicamente de un valor máximo a un valor mínimo. La variación instantánea de la amplitud y otras características de la onda se describen adecuadamente con una función de ondas matemática. Supongamos, por ejemplo, que la altura de una ola del mar varía desde un metro por encima del nivel medio de la superficie hasta un metro por debajo de ella, y así sucesivamente. Podemos describir esa onda mediante una función coseno, puesto que el valor del coseno varía entre los valores +1 y −1, y de nuevo +1, a medida que el ángulo varía desde 0 a 180 y 360 grados, respectivamente. Se denomina ángulo de fase el que corresponde a determinado valor instantáneo de la altura.

La función de ondas matemática que describe la onda de un electrón se representa en relación a su amplitud máxima y al ángulo de fase. La amplitud de la onda de un electrón expresa una probabilidad, que tiene que ver con la posición y la velocidad de una partícula, que sólo pueden determinarse con cierta precisión. En concreto, el cuadrado de la amplitud máxima de la función de ondas de un electrón representa la probabilidad de hallar dicha partícula en un lugar determinado y un tiempo asimismo dado.

El ángulo de fase de la función de ondas de un electrón reviste especial interés a la hora de describir la relación entre dos ondas. Si dos ondas están "en fase" en un lugar o tiempos determinados, ambas se encuentran en la misma situación de su ciclo: por ejemplo, la amplitud de una y otra onda ha alcanzado un valor máximo o mínimo. Si las dos ondas están "completamente fuera de fase", la amplitud de una ha alcanzado su valor máximo, en tanto que la de la otra se encuentra en su valor mínimo. El ángulo de fase de la onda de un electrón se puede expresar también en función de otras magnitudes físicas más intuitivas. En los casos más sencillos, la fase está relacionada con el producto del momento por la distancia recorrida por la onda del electrón y, también, con el producto de la energía por el tiempo.

Estas ideas tejen el cañamazo teórico adecuado para interpretar la figura obtenida en la experiencia de las dos rendijas. Puesto que la energía y el momento de los electrones emitidos por el generador de partículas poseen un mismo valor, las funciones de onda de los electrones tienen la misma fase cuando éstos se encuentran a una distancia dada del generador, una condición que se conoce con el nombre de coherencia. Cuando las ondas de los electrones atraviesan las dos rendijas, se dividen en ondas parciales. Por recorrer estas últimas la misma distancia hasta cada rendija, la onda parcial emergente de la rendija de la izquierda tiene la misma fase que la onda parcial que emerge de la rendija de la derecha. En consecuencia, para un punto de la película que sea equidistante de ambas rendijas, las ondas parciales procedentes de la rendija izquierda y de la rendija derecha estarán en fase. Así, pues, las dos ondas se reforzarán mutuamente y producirán una banda brillante en el centro de la película. Importa señalar también que las bandas brillantes representan el hecho de que la probabilidad de que los electrones incidan en el lugar en que dichas bandas se presentan es el doble de la que corresponde a un punto medio de la película.

Sin embargo, la onda parcial de la derecha debe recorrer una mayor distancia que la onda parcial de la izquierda para llegar a un punto situado a cierta distancia a la izquierda de la banda brillante central. Por tanto, las dos ondas están completamente fuera de fase en algunos puntos de la izquierda. Las dos ondas se anularán y originarán una banda oscura (dado que la probabilidad de que los electrones lleguen a esta zona es casi nula). Para una distancia todavía mayor a la izquierda de la película, la onda de la derecha recorre una distancia que es exactamente igual a un ciclo completo más que la onda de la izquierda. En consecuencia, las dos ondas se encuentran de nuevo en fase y crean otra banda brillante (probabilidad elevada).

A fin de observar el efecto Aharonov-Bohm, la experiencia de interferencias de las dos rendijas debe modificarse ligeramente. La modificación consiste en colocar un solenoide muy largo detrás mismo de la placa, entre las dos rendijas; este solenoide produce un campo magnético en su interior y no posee en absoluto ningún campo magnético ni eléctrico en su exterior. Cuando un haz de electrones atraviesa, en estas condiciones, las dos rendijas y se mueve alrededor del solenoide, la película registra una imagen de interferencias diferente. La nueva figura aparece desplazada en comparación con la figura original, de suerte que las regiones que en un principio eran brillantes se muestran ahora oscuras y, brillantes, las que eran oscuras. Cuando el campo magnético del solenoide se desvanece,

la figura de interferencias recobra su aspecto original.

En este nuevo experimento de interferencias, las fases de las ondas parciales de la izquierda y de la derecha han cambiado, tal parece, a pesar de que el campo magnético está completamente confinado en el interior del solenoide. El cambio de fase de la función de ondas de un electrón en una región en la que no existe campo magnético alguno es una manifestación del efecto Aharonov-Bohm.

Este efecto pone de manifiesto que el cambio de fase de una función de ondas debe estar relacionado con alguna propiedad física existente en el exterior de un campo magnético confinado. Partiendo de las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica, Aharonov y Bohm dedujeron que el cambio de fase debíase al potencial vector magnético, una magnitud que existe tanto en el interior como en las proximidades de un campo magnético. Aunque el potencial vector es un campo vectorial, en el sentido de que tiene una magnitud y una dirección en cualquier punto del espacio y puede cambiar con el tiempo, sólo se puede medir directamente observando los cambios de fase de las funciones de ondas. Los cambios de fase producidos por el potencial vector dan cuenta de todos los efectos magnéticos mensurables que producen sobre las partículas cargadas.

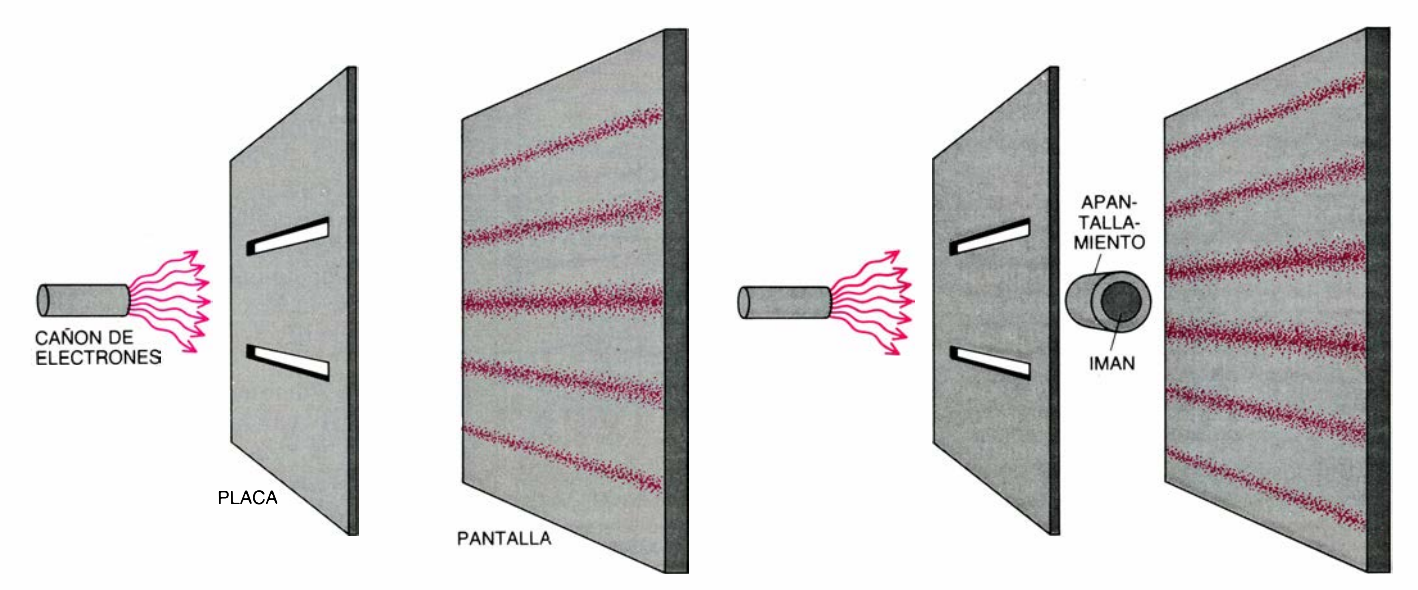
¿Cómo se comportaba el potencial vector sobre la fase de un electrón en el ensayo de dos rendijas? Cuando las ondas parciales de la izquierda y de la derecha avanzaban por la zona libre de fuerzas situada en las proximidades del solenoide, el potencial vector cambiaba el momento de la onda parcial de la izquierda en relación con la onda parcial de la derecha, sin mutar su energía cinética. Puesto que la fase de una función de ondas está relacionada con su momento, la fase de la onda parcial de la izquierda difería con relación a la propia de la onda parcial de la derecha.

El potencial vector magnético y el efecto Aharonov-Bohm tienen sus contrapartidas en la interacción eléctrica. Estas contrapartidas son el potencial escalar eléctrico y el efecto Aharonov-Bohm electrostático. El potencial escalar eléctrico no es un campo vectorial; este potencial tiene simplemente un valor en cada punto del espacio. Aunque el valor absoluto de dicho potencial no se puede determinar, sabemos que la diferencia de potencial entre dos puntos equivale a la energía necesaria para mover la unidad de carga desde un punto al otro. Esta diferencia de potencial se mide en volt.

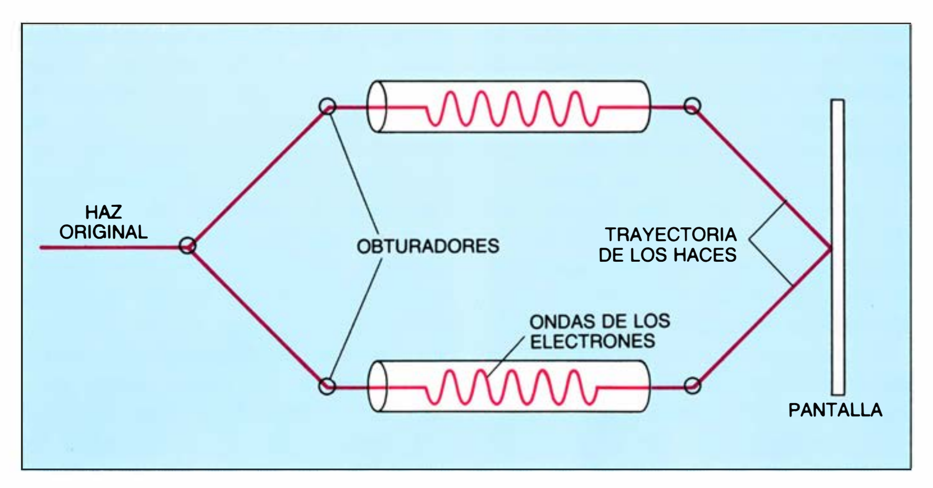
Lo mismo que sucede con el potencial vector magnético, el potencial escalar eléctrico puede producir un cambio de fase en la función de ondas de un electrón. El efecto Aharonov-Bohm electrostático consiste en el cambio de fase de la función de ondas de un electrón provocado por un potencial escalar eléctrico en una región en la que no existe campo eléctrico.

Para explicar el efecto Aharonov-Bohm electrostático podemos echar mano de un experimento ideal [*véase la figura 4*]. Desdoblemos un haz de electrones en dos ondas parciales. Hagamos llegar cada una hasta el interior de un cilindro metálico hueco. Una vez que las ondas parciales hayan penetrado en los dos cilindros, apliquemos una diferencia de potencial entre ambos. Antes de que las ondas abandonen los cilindros, se desconectará el potencial. Procediendo de esta forma, las ondas no se someten a una fuerza eléctrica. Sin embargo, la diferencia de energía total entre las dos ondas resulta alterada por el valor de la carga del electrón multiplicado por la diferencia de potencial entre los dos cilindros. Dado que la fase de la función de ondas de un electrón está relacionada con la energía total y el tiempo invertido en el recorrido, la fase de una de las ondas diferirá de la fase de la otra.

Poco después de que Aharonov y Bohm predijeran los efectos de los potenciales sobre la fase de las partículas cargadas, empezaron los experimentos. Robert G. Chambers, de la Universidad de Bristol, realizó el primero, en 1960. El haz coherente de electrones producido en un microscopio electrónico se desdoblaba en dos, mediante una fibra de cuarzo recubierta de aluminio de 1,5 micras de diámetro. La figura de interferencias resultante evocaba la figura obtenida en el ensayo con dos rendijas. Cuando un filamento de hierro imantado de una micra de diámetro se colocaba inmediatamente detrás de la fibra de cuarzo, la figura se desplazaba. Chambers sostuvo que el campo magnético engendrado por el filamento en la región donde se movían



3. EXPERIMENTO DE INTERFERENCIA CON DOS RENDIJAS, que demuestra el comportamiento ondulatorio de los electrones. Un generador de partículas emite un haz de electrones que se mueven hacia dos rendijas de una placa. Las funciones de ondas de los electrones atraviesan las rendijas y producen una figura de interferencia (*izquierda*). Si un imán introduce un potencial vector (*derecha*) el efecto Aharonov-Bohm provoca el desplazamiento de la figura.



4. EFECTO AHARONOV-BOHM ELECTROSTATICO, observable descomponiendo un haz de electrones y dirigiéndolo hacia dos cilindros metálicos huecos que apantallan a los electrones frente a las fuerzas eléctricas. Cuando los electrones atraviesan los cilindros, se aplica una diferencia de potencial escalar (voltaje) entre dichos cilindros. La figura de interferencia que se observa en la pantalla aparece desplazada en una cuantía que está directamente relacionada con el potencial escalar. (Dibujo realizado por Gabor Kiss.)

los electrones era demasiado pequeño para explicar la magnitud del cambio observado en la figura de interferencia. Este autor concluyó que, tal como habían predicho Aharonov y Bohm, el potencial vector había producido un cambio en la fase de la función de ondas del electrón.

Varios investigadores cuestionaron la conclusión de Chambers. No había éste confinado totalmente el campo magnético en una región pequeña del espacio; ello indujo a algunos a afirmar que la fuerza ejercida por el campo magnético sobre el electrón ocultaba la contribución del potencial vector al cambio producido en la figura de interferencia.

En 1986, Akira Tonomura y sus colaboradores, de la empresa Hitachi de Tokio, resolvieron el problema que representaba el confinamiento del campo magnético, siguiendo una sugerencia de Charles Kuper, del Instituto de Tecnología de Israel. Tonomura sabía que un material magnético homogéneo con forma toroidal poseía un campo magnético, contenido enteramente en el interior del material del toroide. Ahora bien, todos los materiales magnéticos presentan algunas imperfecciones; por tanto, un imán toroidal real poseerá siempre un pequeño campo magnético no confinado. Este pequeño campo de pérdida se evitará recubriendo el imán con un material superconductor. Tonomura construyó un imán de forma toroidal y lo recubrió con niobio, que se convirtió en superconductor para temperaturas por debajo de 9,1 grados Kelvin. Esta disposición permitía asegurar que, en el agujero central, penetra menos del 1 por ciento del campo existente en el interior del imán toroidal.

Un haz de electrones generado en el vacío se desdoblaba en dos: uno de los haces pasaba a través del agujero del toroide; el otro, por la parte exterior del toroide. La reunión de estos dos haces producía una figura de interferencia sobre una película situada inmediatamente detrás del agujero. Al propio tiempo, se creaba otra figura de interferencias que servía de pauta. Cuando el niobio se enfriaba por debajo de 9,1 grados Kelvin y se hacía superconductor, el campo magnético resultaba confinado, de acuerdo con las leyes de la superconductividad; por tanto, el potencial vector en el agujero sólo podía alcanzar cierta intensidad. En virtud de este proceso, el potencial vector cambiaba la fase de los electrones que atravesaban el toroide con respecto a la de los electrones que se movían fuera de él. Esto significaba que (dependiendo de las características específicas del dispositivo experimental), en algunos casos, la figura de interferencia que se obtenía detrás del agujero coincidía exactamente con la figura de referencia; en otros casos, la figura obtenida detrás del agujero aparecía desajustada en relación con la figura de referencia, es decir, las bandas oscuras de una coincidían con las bandas brillantes de la otra. En cualquier caso, el ensayo aportó una comprobación singular del papel del potencial vector en el cambio de las fases de las ondas de los electrones en una región donde no existía campo magnético [*véase la figura 1*].

El efecto Aharonov-Bohm se deja observar cuando los electrones se mueven en el vacío, debido a que la fase de la función de ondas de los electrones permanece bien definida conforme las ondas van desdoblándose e interfiriendo. En los sólidos cuesta más observar el efecto porque los electrones se difunden en las imperfecciones existentes en la red cristalina.

5. POTENCIAL VECTOR (*líneas rojas*) comparado con el campo magnético (*líneas azules*) para un solenoide largo (*izquierda*) y para un conductor largo (*derecha*). Las líneas representan los respectivos campos para una intensidad dada. La circulación del potencial vector a lo largo de una curva es igual al producto del campo magnético por la superficie encerrada por dicha curva. (Esquemas dibujados por Gabor Kiss.)

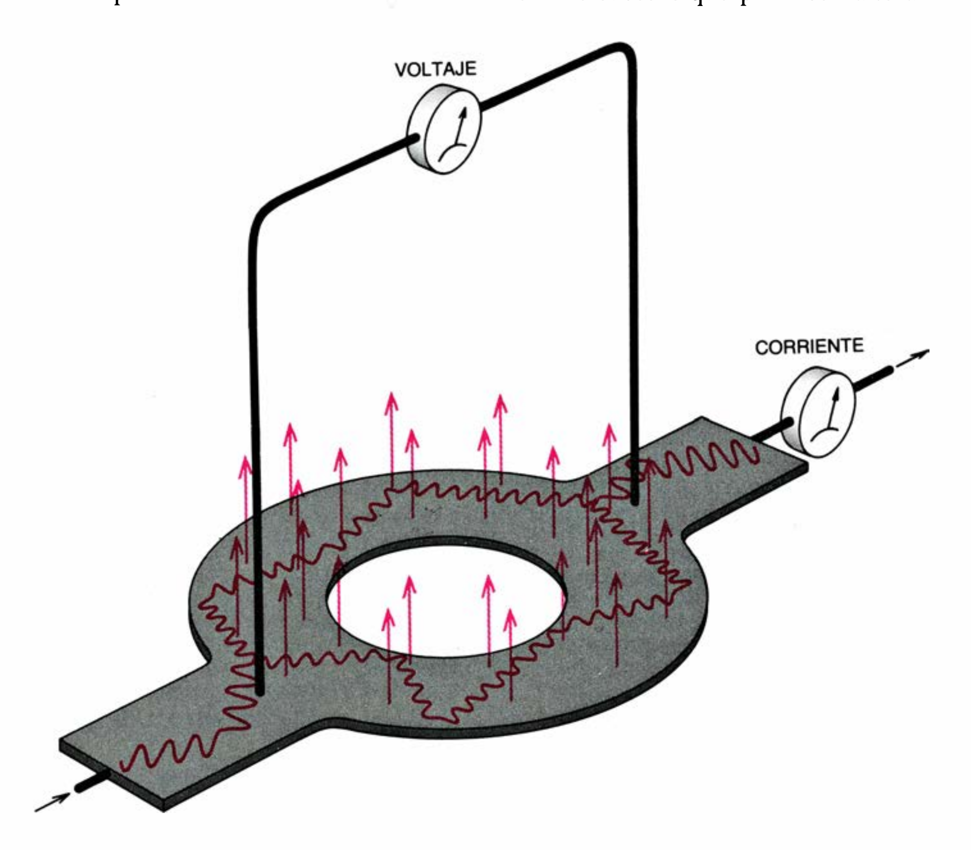
Aunque todos los sólidos presentan alguna forma de difusión, a lo largo de esta última década hemos asistido al desarrollo de diversas técnicas para reducir dicha difusión, hasta el punto en que los electrones se puedan mover casi igual que lo hacen en el vacío [véase "Electrones balísticos en semiconductores", por Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1987]. Pero fue la observación de dos tipos de difusión en los conductores sólidos —la elástica y la inelástica— la que condujo al descubrimiento de los primeros efectos Aharonov-Bohm y otros efectos de interferencias cuánticas en los materiales sólidos.

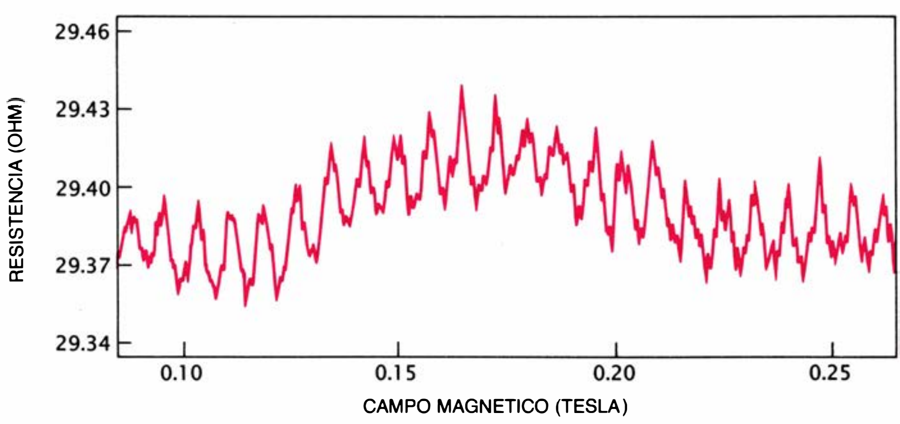
Se produce difusión inelástica cuando los átomos que constituyen un conductor sólido intercambian energía con un electrón. Estrictamente hablando, la difusión inelástica modifica las funciones de ondas de los átomos que constituyen el sólido; en otras palabras, el proceso de difusión provoca un cambio en el estado cuántico del medio en el que se mueven los electrones. Así, un electrón puede absorber energía de las vibraciones de los átomos de una red cristalina, o cedérsela. Una forma de reducir la difusión inelástica consiste en limitar la energía disponible para tales interacciones. Si se extrae una cantidad de energía suficientemente elevada de la red cristalina y el sistema de electrones, de suerte que éstos puedan considerarse virtualmente en reposo, el proceso de difusión inelástica no será un fenómeno frecuente. Para extraer la energía en cuestión, podemos enfriar el conductor a bajas temperaturas. Para una temperatura de pocos grados Kelvin, objetivo asequible, podemos movilizar los electrones de muchos metales a lo largo de varios miles de átomos (una distancia del orden de una micra) sin que tenga lugar la difusión inelástica.

El enfriamiento de un conductor sólido hasta temperaturas bajas produce otro efecto beneficioso. El intervalo de energías para las que los electrones se mueven a través de un sólido disminuye con la temperatura. Cuando la temperatura baja lo suficiente como para que la difusión inelástica resulte improbable, el intervalo de energías está definido con tanta precisión que todos los electrones que se mueven a través del conductor tendrán más o menos la misma energía. Esto provoca que todos los electrones de conducción del sólido interfieran casi igual.

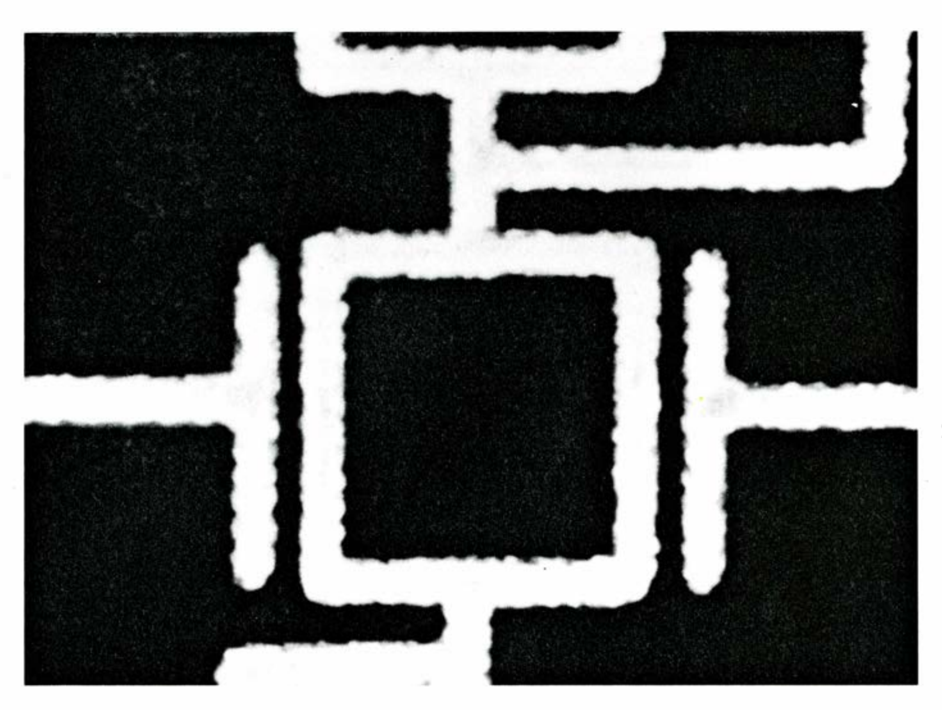
La difusión elástica tiene lugar cuando un electrón encuentra un potencial estático producido por una impureza o un defecto de la red cristalina. El potencial estático altera la fase de la función de ondas de los electrones en una forma bien definida, pero no modifica su energía total. Aunque una distribución al azar de los potenciales estáticos de un sólido desencadenará un cambio de las fases al azar, los cambios serán los mismos para todos los electrones que se muevan a través del sólido con una misma energía. Cuando la temperatura se aproxime al cero absoluto, las funciones de ondas de los electrones sólo experimentarán difusiones elásticas, un proceso que da lugar a un cambio de fase al azar, pero constante y que no afecta a los efectos de interferencia de electrones en un conductor sólido. Este hecho constituye la clave de la observación de los efectos de interferencias cuánticas en sólidos.

Sin embargo, en los sistemas experimentales reales, los conductores sólidos enfriados a bajas temperaturas muestran todavía, en alguna cuantía, el proceso de difusión inelástica; este hecho produce alguna incertidumbre en la fase de las funciones de ondas de los electrones. A medida que el tamaño del conductor sólido disminuye, el número de sucesos que producen altera-





6. ANILLO para medir el efecto Aharonov-Bohm en conductores sólidos (*arriba*). Las ondas electrónicas entran por la izquierda y se difunden a través del anillo, que ha sido enfriado a temperaturas muy bajas. Un potencial vector debido a la existencia de un campo magnético (*flechas*) cambia la fase de la función de ondas de los electrones y modifica la resistencia eléctrica del anillo, cuyo valor se determina midiendo el voltaje y la corriente. El efecto Aharonov-Bohm explica la oscilación que experimenta la resistencia eléctrica del anillo.



7. ESTE DISPOSITIVO DE CONEXION está basado en el efecto Aharonov-Bohm. Un anillo de antimonio de 0,8 micras de diámetro está flanqueado por dos barras. Aplicando un potencial escalar (diferencia de voltaje) a cualquiera de estas dos barras, o a ambas, se consigue que las funciones de ondas de los electrones que se mueven por el anillo cambien de fase e interfieran, de forma tal que el voltaje de salida resulte alterado.

ciones de las fases al azar disminuye. Para observar el fenómeno de la interferencia cuántica, el conductor debe ser lo suficientemente pequeño como para eliminar casi por completo la difusión inelástica. Los experimentos han demostrado que, aunque un conductor metálico de 0,03 micras de alto y ancho y una micra de longitud contiene casi 100 millones de átomos, la fase de la función de ondas de un electrón que se mueva en el seno de dicho conductor se mantendrá casi constante para temperaturas inferiores a un grado Kelvin.

Para cuantificar los efectos de interferencia de electrones en los conductores sólidos, es necesario expresar la mecánica de las ondas de los electrones en términos de magnitudes físicas susceptibles de medirse con facilidad. Cuando la onda de un electrón se mueve a través de un conductor de pequeñas dimensiones, a bajas temperaturas, una parte de la onda se difunde de un extremo al otro del conductor; otras partes son devueltas a sus puntos de origen. De la dificultad que la onda de un electrón encuentra para viajar de un extremo a otro del conductor nos habla la resistencia eléctrica de dicho conductor; a la inversa: de la facilidad con que la función de ondas se mueve nos da una indicación o medida la conductividad del conductor en cuestión. Hace más de 25 años, Rolf Landauer, del Centro de Investigación Thomas J. Watson que la empresa IBM posee en Yorktown Heights, Nueva York, desarrolló un marco teórico para expresar la conductividad en términos de la probabilidad de que la función de ondas de un electrón se transmita a través de un conductor dado. El trabajo llevado a cabo por él demuestra que la conductividad viene a ser proporcional a la probabilidad de transmisión dividida por la unidad cuántica fundamental de resistencia: 25.812 ohm. Este valor es igual a la constante de Planck dividida por la carga del electrón elevada al cuadrado.

Un factor que contribuye a la probabilidad de transmisión y a la conductividad es la interferencia de las funciones de ondas. Markus Büttiker, Landauer y uno de los autores de este artículo (Imry) desarrollaron un trabajo teórico relacionado con los anillos metálicos sin uniones, demostrando que la difusión elástica no destruía los efectos de interferencia cuánticos. Yuval Gefen, Mark Ya. Azbel y el propio Imry predijeron en 1984 que, como consecuencia del efecto Aharonov-Bohm, la resistencia eléctrica de un anillo metálico oscilaría periódicamente cuando el campo magnético aplicado al centro del anillo variara de forma continua. Cuando las funciones de ondas de los electrones que se mueven en diferentes direcciones del anillo se refuerzan mutuamente, la probabilidad de transmisión y, por tanto, la conductividad del material, aumentan. Cuando las funciones de ondas de los electrones se anulan, la probabilidad de transmisión y la conductividad disminuyen. En consecuencia, el valor de la conductividad o resistencia de un conductor se sitúa entre estos dos extremos. En 1981, Boris L. Al'tshuler, Arkady Aronov y Boris Spivak, del Instituto de Física Nuclear de Leningrado, avanzaron otra predicción en ese sentido, que confirmaron experimentalmente Yuri V. Sharvin y su hijo, en el Instituto de Problemas Físicos de Moscú.

Otro firmante de este artículo (Webb), en equipo con Sean Washburn, Corwin P. Umbach y Robert B. Laibowitz, del Centro de Investigación Thomas J. Watson, demostraron, en 1985, el efecto Aharonov-Bohm en pequeños anillos metálicos. El grupo fabricó un anillo de oro sobre una lámina de silicio, anillo que medía 0,78 micras de diámetro interior y 0,86 micras de diámetro exterior. Se aplicaba una corriente a través de un conductor de entrada, unido a uno de los lados del anillo, y se recogía en un conductor de salida situado en el extremo opuesto del anillo [*véase la figura 6*]. Para medir la caída de potencial a lo largo del anillo se unían otros dos conductores a cada uno de los terminales citados, en un punto próximo al aro. El valor de la resistencia del anillo venía dado por el cociente entre el voltaje y la corriente. La aplicación de un campo magnético perpendicular al anillo creaba un potencial vector magnético que circulaba en el plano de la muestra.

Los citados investigadores observaron que la resistencia eléctrica del anillo oscilaba periódicamente, conforme aumentaba la intensidad del campo magnético. Coincidía esto con lo esperado de acuerdo con el efecto Aharonov-Bohm y los potenciales. Las ondas electrónicas que se movían a lo largo del anillo de oro en el sentido de las agujas del reloj obstaculizaban las ondas que se movían en sentido contrario. A medida que el campo magnético y el potencial vector aumentaban, las ondas que se movían en el sentido de las agujas del reloj cambiaban de fase con respecto a las ondas que se movían en sentido contrario al de las agujas del reloj. Cuando la fase había cambiado un ciclo entero por efecto del potencial vector, fluctuaba la resistencia del anillo. El período medio de la oscilación expresado en términos del campo magnético, era igual a 0,0076 teslas. De acuerdo con las predicciones teóricas, el pro-

ducto de esta magnitud por la superficie media encerrada por el anillo es igual al valor de una magnitud mecánico-cuántica fundamental, dada por el cociente entre la constante de Planck y la carga del electrón.

La cuantía de la oscilación de la resistencia es, en este caso, bastante pequeña: un valor del orden del 0,1 por ciento de la resistencia total del anillo. Daniel E. Prober, de la Universidad de Yale, Supriyo Datta, de la Universidad de Purdue, y sus colaboradores confirmaron muy pronto las oscilaciones de la resistencia en otros metales y en semiconductores. Los experimentos llevados a cabo más recientemente, por otros grupos de investigadores, han demostrado la existencia de oscilaciones del orden de hasta un 50 por ciento de la resistencia total. Por otro lado, las oscilaciones de la conductividad de estas muestras son independientes de la resistencia media y equivalen, aproximadamente, al cociente entre la carga del electrón al cuadrado y la constante de Planck. Esta universalidad (es decir, el hecho de que las oscilaciones de la resistencia sean independientes del material y de sus impurezas de difusión elástica) fue predicha por Al'tshuler y, poco después, por Patrick A. Lee y A. Douglas Stone, aquél del Instituto de Tecnología de Massachusetts y éste de la Universidad de Yale.

La observación del efecto Aharonov-Bohm ha abierto un campo de investigación totalmente nuevo, en el que la naturaleza cuántica de los electrones que se mueven en el interior de un sólido puede estudiarse en un dominio situado entre los átomos y los objetos macroscópicos. Estos sistemas "mesoscópicos", cuyas dimensiones superan de lejos las de un átomo o una molécula, pueden manipularse y medirse por medios macroscópicos y, al mismo tiempo, cumplen las leyes válidas en la física microscópica. Estos sistemas muestran directamente los efectos singulares de la mecánica cuántica, por ejemplo, en las medidas eléctricas ordinarias. Así, a través de ellos se puede medir la resistencia eléctrica asociada con el movimiento orbital de los electrones en un átomo. El estudio de estos sistemas contribuirá a proporcionar las respuestas a una serie de cuestiones tan importantes como saber cuáles deben ser las dimensiones de un sistema para que tenga un comportamiento macroscópico.

El efecto Aharonov-Bohm y el fenómeno de las interferencias cuánticas no sólo encierran interés por sí mismos, sino que podrían desempeñar un papel muy importante en el futuro de la electrónica. Desde que se produjo el descubrimiento del transistor, las dimensiones de los dispositivos electrónicos han ido disminuyendo sin cesar: hay conductores cuyo grosor es inferior al millar de átomos. Al mismo tiempo, la potencia por unidad de superficie que disipan, en forma de calor, las pastillas ("chips") de los ordenadores ha aumentado. A menos que se desarrollen nuevos dispositivos capaces de trabajar adecuadamente y consumir menos potencia, se llegará a alcanzar un valor límite en el número de componentes por pastilla. En última instancia, este factor limitaría la velocidad operativa de los dispositivos electrónicos.

La investigación reciente sobre los efectos de interferencia cuántica pone de manifiesto la posibilidad de desarrollar nuevos dispositivos electrónicos en los que la energía disipada sea mínima. Un prototipo experimental de uno de estos dispositivos se ha experimentado ya en un medio a bajas temperaturas; dispositivo que controla la resistencia y el voltaje mediante un potencial para manipular las características ondulatorias de los electrones. En un futuro próximo, a medida que el tamaño de los componentes electrónicos se vaya empequeñeciendo todavía más, se podrán construir dispositivos capaces de mantener el comportamiento mecánico-cuántico de los electrones a temperaturas mucho más elevadas. No podemos concluir sin resaltar que el efecto Aharonov-Bohm y otros efectos de interferencia cuántica, que basan su desarrollo en los fundamentos abstractos de la mecánica cuántica, han sabido encontrar su aplicación práctica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SIGNIFICANCE OF ELECTROMAGNETIC POTENTIALS IN QUANTUM THEORY. Y. Aharonov y D. Bohm en *The Physical Review*, vol. 115, n.º 3, págs. 485-491; agosto de 1959.

SINGLE VALUEDNESS OF WAVE FUNCTIONS. E. Merzbacher en *American Journal of Physics*, vol. 30, n.º 4, págs. 237-247; abril de 1962.

THE PHYSICS OF MESOSCOPIC SYSTEMS. Yoseph Imry en *Directions in Condensed Matter Physics*, editado por G. Grinstein y E. Mazenko, World Scientific Publishing Co., 1986.

QUANTUM INTERFERENCE FLUCTUATIONS IN DISORDERED METALS. Richard A. Webb y Sean Washburn en *Physics Today*, vol. 41, n.º 12, págs. 46-53; diciembre de 1988.

Ciencia y sociedad

Fusión en frío: ¿mito o realidad?

La fusión nuclear tiene un gran atractivo debido a las enormes ventajas que conlleva: la liberación energética es de una a diez veces la producida en la fisión nuclear por unidad de masa, los combustibles empleados son tan abundantes que pueden abastecer energéticamente a la humanidad durante millones de años y, en el peor de los casos, producirían una contaminacióon radiactiva miles de veces inferior a la emitida por los reactores de fisión nuclear.

Todas estas ventajas se encuentran, sin embargo, atenuadas por las grandes dificultades científicas y tecnológicas que deben vencerse para conseguir la fusión nuclear a escala industrial. Para que dos núcleos ligeros se fusionen, es necesario que actúen las fuerzas nucleares que, al ser de muy corto alcance, obligan a que los núcleos estén en contacto; ahora bien, al estar cargados positivamente, este contacto viene impedido por la barrera de repulsión coulombiana. La probabilidad de atravesar cuánticamente esta barrera, por efecto túnel, aumenta cuando disminuye su anchura y altura; en virtud de ello, un procedimiento para conseguir la fusión nuclear es la llamada fusión en caliente, en la que se busca dotar de alta energía cinética (temperatura de millones de grados) a los reactivos (deuterio y tritio, por ejemplo) para que la probabilidad de atravesar dicha barrera alcance valores aceptables y se produzca suficiente número de fusiones.

Pero un relativo acercamiento de los núcleos de deuterio puede conseguirse en condiciones normales de temperatura con la llamada fusión en frío. En condiciones normales de presión y temperatura, la separación media de los deuterones en una molécula de deuterio es de unos 0,74 amstrong, por lo que la probabilidad de atravesar la barrera es tan pequeña que sólo se producen 10^{-70} fusiones por segundo y por molécula de deuterio. En 1947, Frank propuso sustituir un electrón de la molécula de hidrógeno y deuterio por un muon, partícula inestable con una vida media de $2,2 \times 10^{-6}$ segundos, que tiene igual carga que el electrón, pero con una masa 207 veces superior, con lo que los núcleos de hidrógeno reducirían su distancia media en esta cantidad, dando lugar a que la tasa de reacción aumentase en ochenta órdenes de magnitud. Un año más tarde, Sakharov y Zeldovich propusieron lo mismo en la molécula de deuterio y tritio catalizado por muones. Durante su corta vida, el muon sólo puede catalizar unas 110 fusiones, o sea, da lugar a 1 gigaelectronvolt de energía, mientras que, para producir un muon, se necesitan más de 3 gigaelectronvolt; así, pues, el balance energético es, hoy en día, negativo. Sin embargo, la idea de conseguir por otro procedimiento aproximar los núcleos de hidrógeno y obtener una probabilidad aceptable de atravesar la barrera de potencial se ha mantenido latente en la mente de los científicos dedicados a la fusión.

En este contexto hay que acoger el *experimento* de B. Stanley Pons y Martin Fleischmann, tan popular como impreciso. De este experimento se conocen sus especificaciones generales de partida, pero desgraciadamente sus productos están tan pobremente identificados que se podría hablar de conjeturas más que de medidas experimentales. Debido a su forma espectacular de anuncio y a su presentación como panacea del problema energético, estas conjeturas han adquirido notoriedad mundial, pero ello no le otorga en absoluto rigor científico.

Como secuela de este anuncio se han producido varios intentos de reproducir dicho experimento, todos fallidos de una u otra manera, puesto que nadie ha observado densidades de potencia tan altas (24 watt por centímetro cúbicò) ni energías específicas (4 megajoule por centímetro cúbico) como Pons y Fleischmann. Más aún, el equipo de Jones y Rafelski, veteranos de las investigaciones en fusión en frío y autores de un artículo reciente en *Investigación y Ciencia* (septiembre, 1987), han determinado con considerable precisión la tasa de fusiones en la famosa cuba electrolítica y, según ellos, los resultados son absolutamente decepcionantes y en punto alguno permitirían soñar con un reactor de fusión basado en la fusión en frío.

En varias reuniones recientemente celebradas en Washington, a las que han asistido científicos del Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, y en una reunión oficial en el Departamento de Energía para tratar de temas relativos a la fusión, se ha podido recopilar y discutir la información sobre estos experimentos.

Desde la ya famosa conferencia de prensa del 23 de marzo pasado, cerca de un centenar de científicos intentan realizar medidas similares a las de Pons y Fleischmann, sin saber si sus condiciones de experimentación son idénticas a las no descritas por ellos, y pensando en términos de especulaciones teóricas no meditadas, en vez de en realidades teóricas razonablemente presumibles. Anuncios como el realizado por un grupo de científicos de los emiratos árabes dan pie a creer en un juego poco riguroso; y, como éste, algunos otros que se han dado desde los Estados Unidos al Japón.

Otro grupo, el de Frascati, cuyo director es el profesor Scaramuzzi, científico de reconocido prestigio internacional, tuvo que prestarse a una rueda de prensa con un ministro y varios senadores en un acto que poco tenía de científico y mucho de folklórico. En un artículo enviado para publicar en *Europhysics Letters*, consideraba que habían producido neutrones de fusión en un experimento, no electrolítico, empleando deuterio a una temparatura de 77° K. El 24 de abril, cuando en una reunión en Washington el profesor Salvetti describió dicho experimento, el profesor M. Deutsch, del MIT, demostró que los resultados no eran prueba de que se hubiesen producido neutrones de fusión.

Entre los numerosos experimentos realizados en los cuatro puntos cardinales, unos pocos han obtenido energía y escasos neutrones, como los experimentos de Pons y Fleischmann, otros han obtenido neutrones y muy escasa energía, como los experimentos de Jones y Scaramuzzi, un par de ellos han obtenido algo de energía y neutrones, como en el caso del Instituto Bhabha, mientras que la mayoría no han conseguido obtener ni neutrones ni energía.

Pons sugiere que parte del fracaso de estos experimentos se debe al proceso de obtención de las barras de paladio,

y explica que empleando barras de paladio fundido el experimento falló en un 6 por cien de los casos, mientras que empleando barras extruidas el fallo aumentó al 60 por cien.

Actualmente hay teorías para todo: unas para explicar que en estos experimentos no se han producido fusiones y otras para lo contrario, todo ello propiciado por la imprecisión absoluta de la mayoría de los experimentos. Para explicar que el origen de la energía obtenida en el experimento de Pons y Fleichmann no se debe a la fusión del deuterio, se considera que el paladio ha ido acumulando energía durante horas, y que luego la emite espontáneamente, en un proceso que recuerda algo al efecto Wigner del grafito. Los neutrones detectados serían debidos al fondo y a una mala técnica de detección.

Por el contrario, para explicar que la energía y los neutrones detectados se deben a la fusión del deuterio, Takahashi expuso en la reunión de Washington su teoría por la cual, en la electrólisis de agua pesada, el deuterio forma en el cátodo deuteruro de paladio. Numerosos electrones de las bandas de conducción *d* y *s* se apilan cerca de los deuterones. El efecto global es como si en vez de todos estos electrones hubiese uno de masa efectiva cinco veces la del electrón. Esto da lugar a una probabilidad de atravesar la barrera de potencial lo suficientemente elevada como para producir 10^{-23} fusiones por segundo y por molécula de deuterio, de acuerdo con los resultados experimentales comunicados por Jones. Para explicar la escasez de neutrones producidos en varios experimentos, Takahashi y Hegelstein proponen que, en la fusión del deuterio, se produce helio 4 en un estado excitado de 24 megaelectronvolt. Como la probabilidad de transición de este estado al fundamental es nula, el helio 4 no se desexcita emitiendo fotones, sino que puede seguir tres caminos distintos: los dos clásicos de emitir un protón, o un neutrón, o bien por el nuevo camino de transmitir esta energía de excitación de un modo colectivo a la red cristalina de paladio. Este último fenómeno sería tan novedoso o más que la propia fusión en frío, puesto que los tiempos nucleares de emisión de un nucleón desde el estado excitado del helio 4 son inferiores a 10^{-17} segundos, es decir, muchísimo más cortos que los requeridos para la relajación o transmisión de energía a través de una red cristalina.

Para descubrir la verdad en todo este mar de confusiones, habrá que esperar varios meses, quizás años. Hará falta además que los políticos dejen a los científicos iniciar una serie sistemática de experimentos, que puedan ser publicados y sometidos a la crítica de la comunidad científica internacional sin las presiones de los poderes públicos que quieren resolver el problema energético de un plumazo. Entonces podremos saber si todo ha sido un inmenso balón inflado por científicos poco escrupulosos y por políticos oportunistas, en donde hay poco de fusión y mucho de *confusión*, o bien estamos ante un nuevo proceso más prometedor de la fusión en frío. De momento, los últimos experimentos realizados por los laboratorios más prestigiosos dan resultados negativos. (G. Velarde, J. M. Aragonés, J. M. Martínez-Val y J. M. Perlado, Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid.)

El último neandertal

En el verano de 1988 y en el transcurso de unas excavaciones arqueológicas que se venían desarrollando en el sur de la Península Ibérica, en la Cueva del Boquete de Zafarraya (Alcaucín, Málaga), se desenterró una mandíbula de neandertal que, por su excepcional estado de conservación, se ha considerado una de las mejores piezas encontradas en Europa occidental. Su estudio habrá de enriquecer, sin duda, nuestro conocimiento de los Neandertales y su desaparición.

Situada en el límite septentrional de la comarca malagueña de la Axarquía, la Cueva del Boquete de Zafarraya se localiza en el dominio subbético de las Cordilleras Béticas; en las calizas blancas pisolíticas de la Unidad de Zafarraya, de edad liásica (Jurásico inferior). Tanto estas calizas como las dolomías y las calizas dolomitizadas que conforman la mayor parte de la Sierra de Alhama se encuentran muy tectonizadas, presentando fuerte buzamiento de sus estratos, a favor de uno de los cuales se desarrolla dicha cavidad, representando un hábitat excepcional por la variedad de biotopos que circunscriben dicho lugar.

Las excavaciones, iniciadas en 1981, han permitido obtener una secuencia estratigráfica ligada a un complejo musteriense. Con los estudios realizados sobre el material que ha proporcionado el yacimiento, hemos podido inferir no sólo el tipo de hombre que allí vivió, sino también el modo de vida que desarrolló durante la ocupación de la cueva.

Los restos humanos localizados en el yacimiento corresponden a un fémur fragmentario y a una mandíbula, pertenecientes a *Homo sapiens neandertalensis*.

Los caracteres del fémur, así como el examen radiográfico y tomográfico, hacen pensar que pudiera haber pertenecido a un varón adulto próximo a la madurez. Esta pieza presenta una característica especial: antes de haber sido abandonada sobre el suelo de la cueva, fue fracturada intencionadamente sobre la diáfisis femoral; esta misma característica se ha observado sobre numerosos huesos largos de ani-



1. MANDIBULA DE NEANDERTAL encontrada en el Boquete de Zafarraya.

males localizados en el yacimiento. Muy probablemente haya que relacionar este tipo de fractura con la necesidad de extraer la médula.

La mandíbula, perteneciente a un varón que no habría sobrepasado los treinta años de edad, se desenterró con la sínfisis rota a causa de una antigua fractura producida probablemente por la presión de los sedimentos. Salvo una antigua pérdida de sustancia ósea que afecta a la apófisis coronoide derecha, así como el cóndilo izquierdo que ha sufrido una ligera mutilación, la mandíbula está completa y su estado de preservación es excepcional. Conserva *in situ* toda la dentición, excepto tres piezas que han caído *post morten*.

El "hombre de Zafarraya" pertenece al mismo tipo de hombre que ya en el 1848 fuera descubierto en la Cueva de Forber Quarry (Gibraltar) y que posteriormente y hasta nuestros días ha visto multiplicarse los hallazgos del mismo, fundamentalmente en Europa y Asia.

Los hombres de Neandertal han pasado por diversas vicisitudes que lo han supuesto desde una rama aberrante en la historia de la humanidad (M. Boule) hasta la consideración actual de subespecie dentro de nuestra propia especie.

El "hombre de Zafarraya" desarrolló sus actividades en tres espacios diferentes. El primero de ellos vendría a estar ocupado por lo que actualmente se denomina Axarquía, con un relieve laberíntico, formado por amplios barrancos y pronunciadas pendientes. El segundo corresponde a los macizos subbéticos que, por su vigoroso relieve (Sierra de Alhama y Sierra Tejeda con su cumbre, el Maroma, de 2065 metros de altitud), actúa de barrera infranqueable entre la Axarquía y el interior. Por último, y a unos 900 metros de altitud y a escasos centenares de metros de la cueva, se localiza el polje de Zafarraya, un amplio llano donde no se observan desniveles apreciables a lo largo de sus treinta kilómetros cuadrados. Esta variedad espacial genera una diferenciación de biotopos que enriquecerá el medio en que se desenvuelve este hombre.

Eran hábiles talladores de la piedra, obteniendo su utillaje casi exclusivamente de nódulos de sílex, materia muy abundante en la zona. Por medio de la percusión sobre los núcleos, obtenían lascas sobre las que realizaban sus útiles, en este caso compuestos de raederas, puntas, denticulados, muescas, cuchillos y otros, que vienen a definir un Musteriense típico.

En toda sociedad depredadora, una de las actividades fundamentales es la caza. En Zafarraya, a través de los restos paleontológicos podemos deducir el tipo de caza desarrollada por este hombre y el carácter de estacionalidad del hábitat. Entre las especies detectadas en el yacimiento, encontramos la *Capra pyrenaica*, cuyo hábitat natural está centrado en las altas sierras que rodean el entorno del yacimiento. Caballos, bóvidos, corzos y ciervos habitarían en las zonas boscosas del polje, mientras que osos, jabalíes y lobos compartirían el hábitat del polje y las zonas de la Axarquía.

El animal mejor documentado en el yacimiento es la cabra, que representa el 85 por ciento de los restos faunísticos; de ellos, las dos terceras partes son de animales cuyas edades oscilan entre los tres y los seis meses. Si tenemos en cuenta que las cabras se aíslan para parir las primeras semanas de abril y que las crías han nacido en mayo, se puede calcular que el hombre cazó en la zona desde finales de junio a noviembre.

La primera conclusión a la que podemos llegar es que los grupos de neandertales que habitaron Zafarraya tenían una caza especializada, concretándose en animales muy jóvenes de cápridos, lo que supondría una utilización de la cueva como hábitat estacional: acudirían a ella en primavera, para abandonarla a principios del otoño, que coincide con una mayor dureza climática.

Entre las poblaciones neandertales que habitaron en Europa y Asia, se ha puesto en evidencia toda una serie de manifestaciones que nos hablan de un pensamiento elevado. La Cueva del Boquete de Zafarraya ha proporcionado una nueva prueba de los rituales utilizados por los neandertales, siendo la primera vez que se obtienen datos de este tipo en la Península Ibérica. Así, la mandíbula se depositó en una fosa excavada en el mismo suelo de ocupación y rodeada de un círculo de piedras, cubriéndose posteriormente, por un pequeño túmulo compuesto de piedras, restos óseos e industriales, que nos hablan de un ritual de enterramiento ampliamente documentado entre las poblaciones neandertales de Euroasia (Chapelle-Aux-Saints, Le Moustier, La Ferrassie, Monte Circeo, Shanidar IV y otros). Por otro lado, la fractura intencional que presenta el fémur, nos podría sugerir un ritual relacionado con la antropofagia de estos pueblos primitivos, lo mismo que sucede en los yacimientos de Hortus y Kaprina.

Los estudios efectuados sobre los restos de micropaleontología nos han permitido determinar la existencia en el yacimiento de *Microtus* cf. *brecciencis*, *Microtus arvalis*, *Pytymys duodecimcostatus*, *Apodemus* aff. *flavicollis* y *Eliomys quercinus* aff. *lusitanicus*. La correlación que hemos podido establecer entre esta secuencia faunística y la que proporciona el yacimiento del Pleistoceno Superior de Carigüela, situado igualmente en el sur de la Península Ibérica, nos permite enmarcar cronológicamente el yacimiento de Zafarraya dentro de un Würm III, en una fase climática caracterizada por una temperatura relativamente templada y húmeda. Si esta datación de carácter relativo se viene a confirmar por otras técnicas de datación, estaríamos en presencia de las últimas poblaciones de Neandertales que habitaron en nuestro planeta. Este hecho que, en principio, puede parecer que cae fuera del contexto cronológico asignado hasta ahora a los Neandertales, corrobora la existencia en todo el litoral mediterráneo español de una larga perduración de las culturas musterienses, así como la tardía presencia de los primeros hombres modernos.

Las culturas del Perigordiense inferior o Chatelperroniense parecen constituir la transición del Paleolítico Medio al Paleolítico Superior, si no en toda la Península Ibérica, sí al menos en una parte de ella, circunscrita al área cantábrica. Sabemos que, durante los períodos fríos del Würm III, la región cantábrica recibió el influjo de las corrientes culturales procedentes del Perigord francés. No conocemos todavía el proceso de sustitución del Musteriense por el Chatelperroniense; en el sudeste francés, parece quedar demostrado que esta última cultura es el resultado de una evolución local del Paleolítico Medio al Paleolítico Superior, cambios que operarían los propios neandertales. La región mediterránea peninsular se aleja de la cantábrica: en aquélla, apenas si está esbozado el Chatelperroniense, localizándose en Cataluña como zona de contacto entre el sudeste de Francia y el noreste de la Península Ibérica.

Será con la presencia del Auriñaciense cuando asistamos a la llegada de hombres modernos a la Península Ibérica. Lo mismo que ocurría con el período anterior, la región más sensible a las nuevas corrientes, y donde mayor presión ejercerán las nuevas poblaciones, será la cantábrica. En el sudeste de Francia ese episodio acontece hacia el

34.000; en la Península Ibérica, se produce unos miles de años más tarde. Durante este período se sustituirán probablemente los últimos grupos neandertales del sur de España (último lugar colonizado por los nuevos hombres), que continuaban con sus propias tradiciones culturales, al margen de lo que estaba ocurriendo en el resto del continente. (Cecilio Barroso y Francisca Medina.)

Universo ambidextro

Cualquier alumno de físicas sabe que el mundo de las partículas elementales se divide en fermiones y en bosones. Son fermiones el electrón, el protón y el neutrón, partículas que están tradicionalmente asociadas con la materia. Son bosones el fotón y otras partículas tradicionalmente asociadas a la transmisión de las fuerzas de la naturaleza.

En un artículo escrito por Tom D. Imbo, Chandni Shah Imbo y E. C. G. Sudarshan, de la Universidad de Texas en Austin, sometido a examen para su publicación en la revista *Physical Review Letters*, los autores mantienen que, bajo ciertas circunstancias, la distinción entre ambos tipos de partículas se pierde. Introducen nuevas partículas; entre ellas, los "ambiones", que actúan como bosones y como fermiones.

Los fermiones difieren de los bosones en varios aspectos. Los fermiones tienen espín semientero, es decir, 1/2, 3/2, etc.; los bosones en cambio tienen espín entero 0, 1,. . . Los fermiones se describen matemáticamente en términos de una función de onda antisimétrica. Si la posición de dos fermiones se intercambia, el objeto matemático que describe el estado del sistema se multiplica por -1. Por otra parte, los bosones están descritos por una función de onda simétrica; si se intercambian las posiciones de los dos bosones, la función de onda no cambia.

Estas diferencias confieren a los fermiones y a los bosones propiedades radicalmente distintas. Dos fermiones idénticos no pueden estar, a la vez, en el mismo sitio, porque, si las partículas intercambian sus posiciones, la función de onda es la misma y a la vez su opuesta, circunstancia obviamente imposible. Por otra parte, los bosones tienden a estar juntos, fenómeno que se manifiesta en la famosa "condensación de Bose-Einstein".

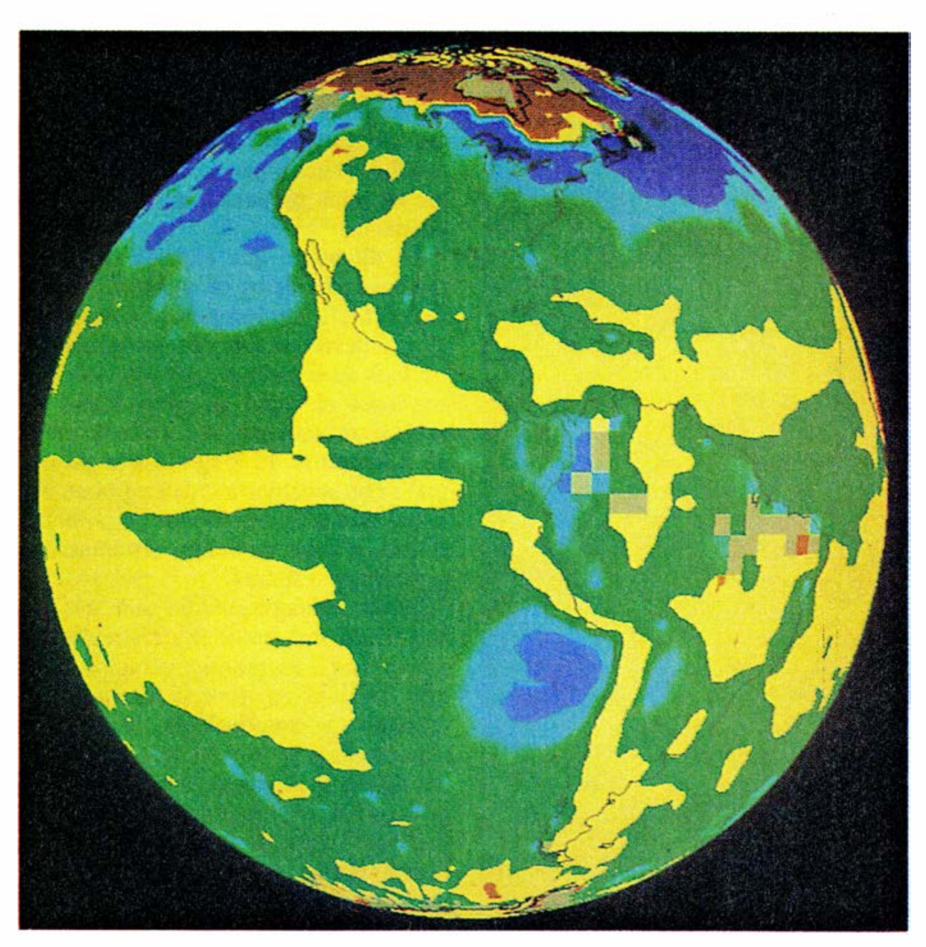
¿Por qué abandonar una clasificación que tan fructífera se ha manifestado hasta ahora? Los físicos describían hasta hace poco las partículas en un espacio tridimensional ordinario; éste permitía distinguir entre bosones y fermiones. Ahora bien, en un plano bidimensional las partículas pueden comportarse como algo intermedio entre los bosones y los fermiones. Pueden mostrar características que no son ni de unos ni otros, sino intermedias. Tales partículas se han estudiado detalladamente durante los últimos cinco años: obedecen estadísticas "fraccionarias" y su denominación más común es la de "anyones" o "unos".

Los espacios investigados por el grupo de Texas tienen propiedades topológicas que permiten que las partículas se comporten, a la vez, como fermiones y como bosones. Un ejemplo que ilustra este hecho se obtiene al considerar el movimiento de dos partículas idénticas en una esfera donde se identifiquen dos puntos diametralmente opuestos. Una función de onda correspondiente a dos bosones se convertirá en la función de onda para dos fermiones después de que las partículas hayan descrito ciertas trayectorias en este espacio. Tales partículas son los "ambiones" o "los dos".

Como los "anyones" existen en superficies de dos dimensiones, se cree que adquieren especial importancia en el efecto Hall cuántico y la superconductividad caliente, fenómenos que son efectos de superficie. Los "ambiones", que existen en espacios de dos y tres dimensiones, pueden revestir un interés mayor. Sin embargo, hay que progresar todavía mucho más en su conocimiento.

Inmovilizar las nubes

Cuanta mayor importancia reciben las nubes en los modelos climáticos, mayor es la ignorancia de su comportamiento reconocida por los científicos. Se han comparado doce modelos climáticos procedentes de seis países distintos; si se eliminaban en todos ellos las ecuaciones que simulaban la



2. *LOS EFECTOS DE LAS NUBES en la temperatura, medidos en el marco del proyecto ERBE. Las regiones donde se produce un fuerte enfriamiento debido a las nubes aparecen coloreadas en azul; el color verde representa efectos un poco menores; en amarillo se señalan las zonas donde el efecto neto es despreciable, y, en color rojo, zonas donde se produce un efecto neto de calentamiento. La imagen ha sido facilitada por V. Ramanathan, de la Universidad de Chicago.*

influencia de las nubes, coincidían las predicciones acerca del calentamiento producido por el efecto invernadero. Pero en cuanto los modelos introducían el efecto de la cobertura nubosa del planeta, sus predicciones divergían en un factor tres.

Se desconoce cuál es la influencia que ejercen las nubes en el efecto invernadero. Por una parte, las nubes actúan de reflectores de la radiación solar, contribuyendo al enfriamiento de la Tierra; por otra, favorecen el calentamiento del planeta, al evitar que el calor escape de las capas inferiores de la atmósfera. Tampoco todas las nubes se comportan igual. Los estratos, nubes densas que se sitúan en las zonas más bajas de la atmósfera, producen un efecto neto de enfriamiento gracias a su albedo. Los cirros, nubes delgadas y de alta cota, semitransparentes, permiten el paso de la luz del Sol pero impiden que escape la radiación infrarroja emitida por la Tierra (al igual que lo hacen el dióxido de carbono y otros gases de invernadero), contribuyendo así al calentamiento de la atmósfera.

Más allá de la observación de esos fenómenos, siguen sin conocerse muchos aspectos. Por ejemplo, ¿qué ocurre cuando estos dos tipos de nubes se producen simultáneamente? Los modelos vigentes prefieren ignorar su existencia.

La dificultad que entraña la elaboración de modelos de nubes obedece, en parte, a su comportamiento, que abarca desde escalas microscópicas, los núcleos de la nube a cuyo alrededor se condensa el vapor de agua, hasta escalas macroscópicas, las ondas de miles de kilómetros de longitud que se observan en la cubierta nubosa global. No habrá nunca un ordenador de potencia suficiente para modelizar sistemas con escalas tan dispares.

Las nubes cuyo estudio está más desarrollado son las de interés meteorológico, como los grandes cúmulos, o las que contribuyen de una forma determinante a la meteorología. Nubes que, sin embargo, no son las más interesantes desde el punto de vista climatológico global. Un ejemplo aclarará la distinción; los estratos marinos, que cubren enormes extensiones del océano en latitudes frías, no producen lluvia ni nieve, ni tienen una actividad eléctrica importante; en sentido meteorológico, son nubes poco importantes, aunque desde el punto de vista climatológico gobiernen, de una forma determinante, el albedo terrestre.

Los climatólogos han abordado diversos proyectos de estudio de nubes a gran escala. El Proyecto Internacional de Climatología de Nubes mediante Satélites (ISCCP) recoge la información enviada por satélites meteorológicos geoestacionarios y satélites polares. Para mejorar la interpretación de la información del satélite, la NASA ha iniciado el proyecto FIRE de observación de nubes desde el suelo, aviones y satélites.

Otro programa, el ERBE, en el que los satélites miden el efecto neto de las nubes sobre la temperatura de la Tierra, ha obtenido importantes resultados: después de analizar gran cantidad de datos, un equipo de la Universidad de Chicago ha determinado que la cobertura global nubosa (que abarca, aproximadamente, la mitad de la superficie terrestre) tiene un efecto neto significativo de enfriamiento.

Pero esos descubrimientos, a pesar de su importancia, no dicen nada sobre el comportamiento de las nubes en un clima cambiante. La mayoría de los modelos climáticos prevén que un aumento de la temperatura de la atmósfera, debido al efecto invernadero, implicará la formación de nubes altas como los cirros, cuyo efecto sería el de aumentar todavía más el calentamiento atmosférico. Pero no hay forma de averiguar si estas predicciones van en la dirección correcta. Aunque algunas de estas predicciones se someten a prueba mediante el análisis de los registros del clima del pasado, examinando el hielo, los sedimentos oceánicos y los anillos de los árboles, esta información no aporta datos acerca de la cobertura nubosa.

Los meteorólogos temen también que puedan estar omitiendo variables importantes en sus modelos. Hace dos años, por ejemplo, se produjo una gran agitación en los ambientes científicos, cuando se propuso que la producción de sulfuros en el plancton podría influir en la formación de las nubes y, por consiguiente, en el clima. Esta hipótesis ha quedado puesta en entredicho: si fuese cierta, dado que las emisiones de azufre, de origen humano, en el hemisferio norte vienen a doblar las de las emisiones del plancton, debieran haberse notado ya cambios perceptibles en el clima, y éste no es el caso.

El tema del plancton no está zanjado definitivamente. Los investigadores se encuentran ante un mar de dudas y se ven incapaces de elaborar nuevos modelos del clima. De momento, la ciencia se limita a intentar entender lo que ocurre.

Ciencia y empresa

Investigación para la empresa

Al norte de la ciudad tejana de Austin se encuentra "Microelectronics and Computer Technology" (MCC), consorcio de investigación industrial que abrió sus puertas en 1983. Cinco años más tarde, "Semiconductor Manufacturing Technology" (SEMATECH), consorcio mixto de gobierno e industria privada, se instaló a unos veinte kilómetros de distancia. No son los únicos. Japón, Estados Unidos y varios países de Europa han empezado a alentar consorcios de investigación mancomunados para analizarlo todo, desde el cemento hasta los semiconductores.

Los consorcios de investigación se han puesto de moda. Su organización varía. Algunos proyectos están subvencionados por los gobiernos locales, ansiosos de atraer inversiones industriales a la zona; otros son contratos entre universidades y empresas. Para las universidades, estos proyectos pueden suponer más dinero para la investigación, mejor equipamiento y un atractivo adicional para los alumnos aventajados. Para las empresas, tal colaboración puede ayudar a mantenerlas en primera fila de áreas de la investigación básica que difícilmente podrían realizar en casa; les da también acceso a un equipo de investigadores competentes.

Pero hay consorcios y consorcios. Los norteamericanos que han atraído la máxima atención son los del estilo de MCC y SEMATECH, cuyo objetivo es mantener competitivas las industrias, al desarrollar técnicas genéricas que las compañías pueden aprovechar para sus objetivos específicos. En particular, se espera avanzar en la televisión de alta definición y los superconductores.

El propio funcionamiento marca los límites de las posibilidades de los consorcios: no pueden ser meros laboratorios de investigación a los que acuden las empresas para aprovecharse de sudores ajenos, ni rectores de las líneas de desarrollo de las compañías. Antes bien, los consorcios deben hallar vías de maridaje con sus empresas patrocinadoras, de modo que unos y otras puedan concebir conjuntamente ideas y transformarlas en prototipos.

"La parte científica es la fácil", dice Grant A. Dove, ejecutivo de MCC. Las dificultades presentan dos vertientes: estimular a las empresas patrocinadoras para lanzarlas a explorar una nueva técnica e imbuir en los investigadores un criterio más exacto de las necesidades y preocupaciones del patrocinador. "La creación de nuevas técnicas se sucede en los Estados Unidos a un ritmo sin parangón en ningún otro lado", reconoce el almirante Bob R. Inman, también de MCC.

La mayoría de los consorcios, fundados como fuente de creación y alimentación de nuevas técnicas, no se sintió en la obligación de pensar en la aplicación de las nuevas técnicas cuando establecieron sus calendarios de investigación. Para ellos, la "transferencia tecnológica" significaba que, cuando quienes desarrollaban un proyecto alcanzaban un hito importante, resumían el trabajo realizado en un informe y lo entregaban al comité de enlace de la empresa subvencionadora. "Creíamos entonces que, para aplicar la técnica, bastaba recibir el informe", expone Eugene Lowenthal, responsable de la ingeniería de ordenadores de MCC.

Las firmas patrocinadoras, por su parte, consideraban a los consorcios lugares mágicos donde la inversión de un duro les ahorraría millones en investigación. Empiezan a descubrir que, para obtener el máximo provecho de su participación, no basta con la aportación económica acordada. La experiencia dice que de las empresas que se limitan a invertir en un consorcio y esperan a ver qué ocurre, acaban por descubrir que no ocurre –casi nunca– nada. Consorcios y patrocinadores han aprendido que la explotación práctica requiere el desarrollo conjunto del proyecto, a modo de un proceso fluido en el que los investigadores y los responsables de las empresas estén en un continuo intercambio de ideas.

MCC pagó cara esa lección, en su proyecto de automatización del diseño. Los investigadores sabían que las compañías patrocinadoras buscaban nuevos medios de diseño ayudado por ordenador (CAD). El laboratorio del consorcio comenzó desarrollando algoritmos en LISP, un lenguaje de programación. Pero lo que las empresas esperaban eran medios operativos, no algoritmos que ellas debieran adaptar. Era, según frase que hizo fortuna, "como alimentar a un tigre con forraje". El programa de CAD del consorcio se reorganizó el año pasado.

La importancia del trabajo conjunto se puso de manifiesto durante el desarrollo de un sistema experto para crear circuitos integrados. Proteus, nombre del proyecto, captó la atención de un directivo de la empresa NCR. Recomendó éste al Consejo de administración que la compañía destinara un ingeniero para trabajar en el proyecto. Durante un año, el ingeniero de NCR pasó una semana al mes con el grupo del Proteus. Se llevó consigo los programas desarrollados por el laboratorio del consorcio a Fort Collins, enclave donde NCR tenía sus ingenieros y su laboratorio de aplicación. Tras los oportunos ensayos, volvió a MCC con cuestiones concretas y sugerencias prácticas de cómo hacer que Proteus satisficiese mejor las necesidades de NCR. No se perdió el tiempo: la aplicación de Proteus se convirtió en la primera técnica de MCC que llegó al mercado.

Los consorcios han descubierto, asimismo, que deben acercarse a las necesidades y apremios de las empresas con la sensibilidad de sus empleados genuinos. Por ejemplo, con independencia del mérito de cualquier avance técnico, la acumulación de costes adicionales en un proyecto destruirá el interés incluso del patrocinador más entusiasta.

Por su lado, las empresas están dedicando más personal propio a la tarea

de colaborar con los proyectos exteriores. Digital Electronics, que ayuda a financiar unos 200 proyectos de investigación en distintos consorcios, exige ahora que cada proyecto tenga un patrocinador. La inclusión de partidas para proyectos abordables en los consorcios, dentro del capítulo presupuestario único de investigación, estimula a los directivos a seguir de cerca el trabajo realizado en los consorcios: la investigación externa viene a ser así una extensión de la interna.

Esas lecciones no han caído en saco roto para SEMATECH, consorcio fundado para desarrollar semiconductores. Se concentra, en particular, en el desarrollo de técnicas de manufactura para producir pastillas de silicio de 12 centímetros (y, ocasionalmente, de 20 cm) que son el substrato de la mayoría de los microprocesadores.

La mitad del personal de SEMATECH estará formado por investigadores asignados por sus empresas para trabajar allí por períodos de dos años.

Pese a todo, los consorcios representan sólo un paso hacia el objetivo de potenciar la competitividad. Los cambios más importantes deben producirse dentro de las propias compañías. A nadie debe sorprender que las que obtienen los mejores resultados en el aprovechamiento de técnicas procedentes de consorcios sean las que tienen fama de fomentar la innovación en casa.

Un asunto trufado

La imagen la tenemos estereotipada: un día cualquiera de invierno en el sur de Francia, ramas de roble crujiendo al viento, una cerda tirando impacientemente de su traílla al captar el olor de las trufas escondidas cerca de las raíces de un árbol. Durante siglos, los epicúreos han tenido que confiar en tan tradicionales métodos de conseguir trufas. Ahora sólo tienen que esperar a la próxima tanda de producción, porque las cosas empiezan a cambiar. Una empresa francesa está comercializando un aceite artificial de trufa que copia exactamente el aroma del hongo. Dos empresarios californianos cultivan trufas en miniatura en interiores.

Aunque, por su origen, forma parte de hongos tan comunes como la roya del castaño y el hongo de la penicilina, el *Tuber melanosporum* –la trufa negra– se ha llamado con frecuencia el diamante de la alta cocina. No hay palabras para describir su delicado sabor ("rancio" podría satisfacer a un paladar menos cultivado; para las cerdas, las trufas recuerdan atractivamente el olor de sus potenciales parejas).

Para los gastrónomos empedernidos, la disminución de las cosechas constituye una auténtica preocupación. Las trufas, que tardan unos siete años en alcanzar su diámetro maduro de tres a cinco centímetros, se encuentran principalmente en zonas de Francia, Italia y España. Desde 1925, en que la recogida anual de trufas era de unas 450 toneladas, las cosechas han descendido fuertemente hasta sólo 20 toneladas en 1986. Esa caída puede reflejar la pérdida de pies de roble, donde el hongo tiende a crecer.

Con ese telón de fondo aparece en escena Thierry Talou, ingeniero químico del Instituto Politécnico Nacional de Toulouse que defenderá este año su tesis doctoral sobre trufas. Por indicación de Pébeyre, una de las primeras empresas francesas de distribución de esos hongos, Talou se ha dedicado estos últimos años a la disección química del aroma de la trufa. Empleó cromatografía de gases para aislar los compuestos volátiles que contribuyen al olor. A diferencia de algunas frutas y hortalizas, en las que un compuesto produce el aroma característico, las trufas maduras deben su aroma a una mezcla de no menos de 14 compuestos, dice Talou. Entre ellos encontró que el sulfuro de dimetilo desempeña un papel destacado, aunque no predominante. Talou reprodujo el aroma de la trufa mezclando los compuetos con aceite vegetal.

¿Hasta qué punto reproduce el aroma del aceite al original? La réplica química es buena, dice Talou. El aceite de trufa ha sido también puesto a prueba por famosos cocineros franceses; le han asegurado, confiesa, que el aceite es "una perfecta imitación del famoso aroma de la trufa negra". Quizá más críticos fueron, sin embargo, los experimentos de campo. "Las muestras de nuestro condimento enterradas en el suelo fueron detectadas por perros adiestrados con el mismo éxito que si fueran trufas", informa Talou. (Hace dos años, Talou ensayó la búsqueda de trufas con un detector portátil de gases en vez de animales. El sensor, provisto de succión, incluía una bomba de vacío y un detector de gases del tipo de ionización por llama. Aunque detectaba fácilmente la presencia de trufas sobre el suelo, el detector no pudo encontrar trufas enterradas en una zona donde un perro olfateó tres. Consecuentemente, Talou da gran valor a las pruebas con animales.)

Sin embargo, hay más de una manera de desarrollar una trufa, como está demostrando Moshe Shifrine, inmunólogo retirado en California. Durante los últimos treinta años, Shifrine ha pasado su tiempo libre jugando con esporas de trufa. Hace varios años, dio con un medio de cultivo que le permitió obtener trufas. Con la ayuda de Randy Dorian, antiguo investigador en biotecnología, Shifrine ha ido aumentando sus cosechas hasta aproximadamente 30 kilos por semana. Sin embargo, como Shifrine coge sus trufas tras un año de crecimiento, sus hongos son pequeñitos comparados con sus hermanos silvestres. Por ello, vende aceite de trufas, pasta, polvo y jugo, pero no trufas recién recogidas.

Los productos "La Truffe" de Shifrine comenzaron a llegar al mercado de consumidores de los Estados Unidos hace un año; una filial de Pébeyre vende, desde el año pasado, el "Arome Artificiel de Truffe" de Talou a cocineros profesionales de Europa. Aun-





1. Las trufas negras crecen bajo tierra, en la proximidad de las raíces de los robles. Se cogen en los meses de invierno, con ayuda de perros y cerdas adiestrados. (Fotografía reproducida por cortesía de Pébeyre)

que ambos investigadores sostienen que los clientes quedan contentos con el sabor de sus productos, hay discrepancias. Talou observa que, de acuerdo con "técnicos sensoriales", el aroma contribuye solamente al 75 u 80 por ciento del gusto de un alimento. De las trufas de California, Talou dice que, en Francia, los productos "La Truffe" tendrían que cumplir rigurosas normas –entre ellas, recuento mínimo de esporas– antes de poder ganar el apelativo de "truffes".

Hologramas en filatelia

A finales de 1988, los servicios de correos de Austria pusieron en circulación sellos con una figura holográfica. Estos sellos han despertado gran interés entre los coleccionistas: cada uno de los 3,5 millones vendidos en tres días multiplica ya por cuatro su precio de salida. Pero la industria y el coleccionismo no se detienen; en Francia aparecerá pronto un sello en braille.

Para aplicar la holografía a la impresión de sellos de correo, lo que implica una tirada de varios millones de ejemplares, se ha ideado un método de fabricación rápido. Los hologramas se fabrican uno a uno, proceso que no permite un volumen de producción suficiente en relación con la demanda; los austríacos han diseñado un proceso de producción por planchas de 16 unidades. La principal dificultad que comporta este sistema estriba en obtener la fidelidad y reproducción adecuadas de los hologramas dentro de cada plancha.

Una imagen holográfica es una imagen fotográfica que requiere una luz coherente y monocromática. El origen de la holografía se remonta a 1947, aunque su aplicación no fue posible hasta la aparición del láser, en 1960. La fotografía reproduce en un plano las diferentes luminosidades de un objeto: registra la intensidad y la amplitud de la onda luminosa. Utiliza como información las fases de onda; en particular, las relaciones de fases del campo de onda emitidas por el objeto. Las diferencias de fase se transforman en diferencias de amplitud y se fijan sobre una placa fotográfica; se obtienen gracias a las interferencias entre dos campos de ondas luminosas monocromáticas y coherentes. (El láser proporciona una longitud de onda y fase constantes, necesarias para obtener interferencias netas.) Los haces secundarios, emitidos a partir del haz de referencia, mediando una lámina semitransparente, iluminan el objeto desde varios ángulos (como mínimo dos). Sobre la placa fotográfica sólo se observa una rejilla de franjas de interferencia micrométricas, cuya distribución depende de la configuración del objeto.



2. El sello austríaco visto de frente y de costado

Todos los datos procedentes de los distintos ángulos de visión impresionan la misma película de alta resolución (4000 a 5000 rasgos por milímetro). Las imágenes de interferencia se transforman luego en un relieve de superficie muy fino. La película plástica, que denominamos "máster", soporta un grabado especialmente fino. Se sumerge dicha película en un baño electrolítico para que se desarrolle una fina capa de níquel que reflejará así las anfractuosidades de la película. La hoja de níquel, sobre la que se reproduce el holograma en microrrelieve, sirve para imprimir una serie limitada (unas 2500) de láminas plásticas en poliéster. Las copias de poliéster resultantes ya pueden leerse.

Existen varios tipos de hologramas. En los estereogramas, que son láminas transparentes colocadas entre dos placas de vidrio (de gran tamaño), la visión recrea una impresión de volumen en el espacio situado detrás de la lámina. Los hologramas por reflexión forman la imagen sobre un fondo opaco. Los poliésteres pueden estamparse también en papel mediante calor (o se pueden aplicar a una superficie adhesiva): éste es el método empleado en la fabricación de los sellos austríacos. Otros tipos más elaborados exigen técnicas parecidas a las cinematográficas: procedimientos multiplex. Una cámara que pivota alrededor del objeto dotado de un movimiento lento va registrando las imágenes holográficas. Se pueden obtener así 1080 imágenes, o 540 pares estereoscópicas. El registro de todas estas imágenes en una misma placa sensible permite formar un holograma animado. El movimiento se manifiesta al girar la lámina, colocada en un cilindro, o al mirar la imagen desde distintos ángulos. Existen también hologramas sonoros, en los que el sonido y la imagen cambian al unísono según la posición y orientación del observador con respecto a la figura.

El éxito de los hologramas en la industria gráfica viene limitado por su alto coste y por el carácter artesanal de las técnicas de fabricación. A pesar de todo, los hologramas suscitan interés, no sólo por su aspecto fascinante y divertido sino también como método de lucha contra las fotocopias y reproducciones ilegales. Por ello se asoman tímidamente en algunos campos donde el peligro de falsificación es mayor: los sellos en Austria, un nuevo billete de banco en Australia, relieves grabados en algunas tarjetas de crédito o en productos de exportación. La elaboración de las láminas de níquel exige una técnica dura y refinada, que actualmente sólo se lleva a cabo en los Estados Unidos.

El futuro de la holografía irá emparejado al de las técnicas numéricas de imagen de síntesis. Según los especialistas de la sociedad *Holosoft*, la numeración de las imágenes holográficas permitirá desarrollar otro campo de investigación para las aplicaciones de las artes gráficas. Se contempla ya la posibilidad de diseñar hologramas con imágenes dotadas de movimientos rápidos.

Astrocitos

Años atrás, creíase que estas células cerebrales, llamadas así por su forma estrellada, eran elementos de sostén. Investigaciones recientes demuestran, sin embargo, que intervienen en la actividad, el desarrollo y la patología del cerebro

Harold K. Kimelberg y Michael D. Norenberg

Cuando se aborda el funcionamiento del cerebro humano solemos situarnos de inmediato en una óptica neuronal. Las neuronas, células excitables, permiten el procesamiento de la información en el cerebro mediante la transmisión de señales eléctricas complejas. Está justificada, pues, la sorpresa del oyente cuando se le hace saber que más de la mitad del volumen cerebral está ocupado por células inexcitables. De éstas, la neuroglía o "pegamento de nervios", si atendemos a su etimología, constituye la clase principal. Y en el seno de las células gliales destacan los astrocitos, o astroglía.

Así llamados por su forma estrellada, los astrocitos se conocen desde finales del siglo XIX. Durante mucho tiempo, se les atribuyó una función meramente estructural, pasiva o de sostén de las neuronas. Sin embargo, en algo más de una década, esa opinión cambió radicalmente merced a los adelantos en los métodos de identificación y cultivo de astrocitos, que permitieron entender mejor sus funciones. Sabemos hoy con certeza que los astrocitos tienen misiones fundamentales en la fisiología normal, en el desarrollo del cerebro y en la patología del sistema nervioso. Resulta evidente que no conoceremos bien el funcionamiento del cerebro sin antes dominar la variadísima actividad de los astrocitos.

HAROLD K. KIMELBERG y MICHAEL D. NORENBERG han centrado sus investigaciones en el estudio del astrocito. Kimelberg es profesor de investigación en la división de neurocirugía de la Facultad de Medicina de Albany. Allí enseña también bioquímica y farmacología, amén de dirigir el programa de neurociencias. Desde que se trasladó a Albany en 1974, se ha dedicado en exclusiva al estudio de los astrocitos. Norenberg es profesor de patología y director de neuropatología en la Facultad de Medicina de la Universidad de Miami. Su investigación se ha polarizado en las enfermedades degenerativas del cerebro causadas por alteraciones metabólicas y en la intervención de los astrocitos en las mismas.

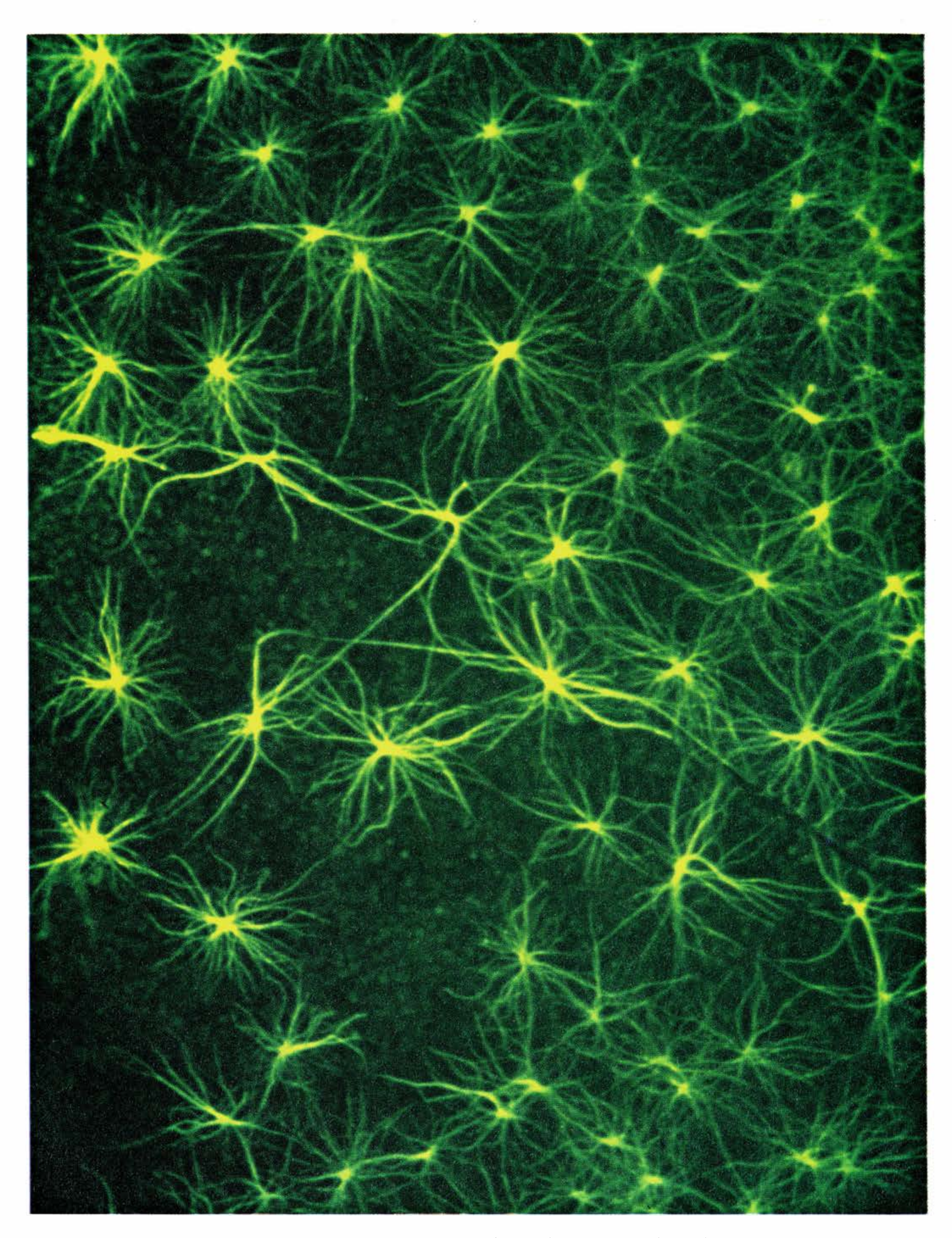
Identificación del astrocito

A Rudolf Virchow, eminente patólogo alemán, debemos la acuñación del término neuroglía en 1846. Designaba, con él, las regiones existentes entre las neuronas, análogas en su opinión al tejido conectivo de otros órganos. La aplicación de nuevas técnicas de tinción mediante impregnación metálica desarrolladas por el citólogo italiano Camillo Golgi en el ecuador de la década de 1870 puso de manifiesto que las regiones en cuestión constaban de un tipo peculiar de células no neuronales. Por su parte, Santiago Ramón y Cajal y su discípulo Pío del Río Hortega, pioneros de la neuroanatomía española, perfeccionaron dichas técnicas de tinción e idearon un sistema de clasificación de las células gliales que, en gran parte, se ha mantenido vigente hasta nuestros días.

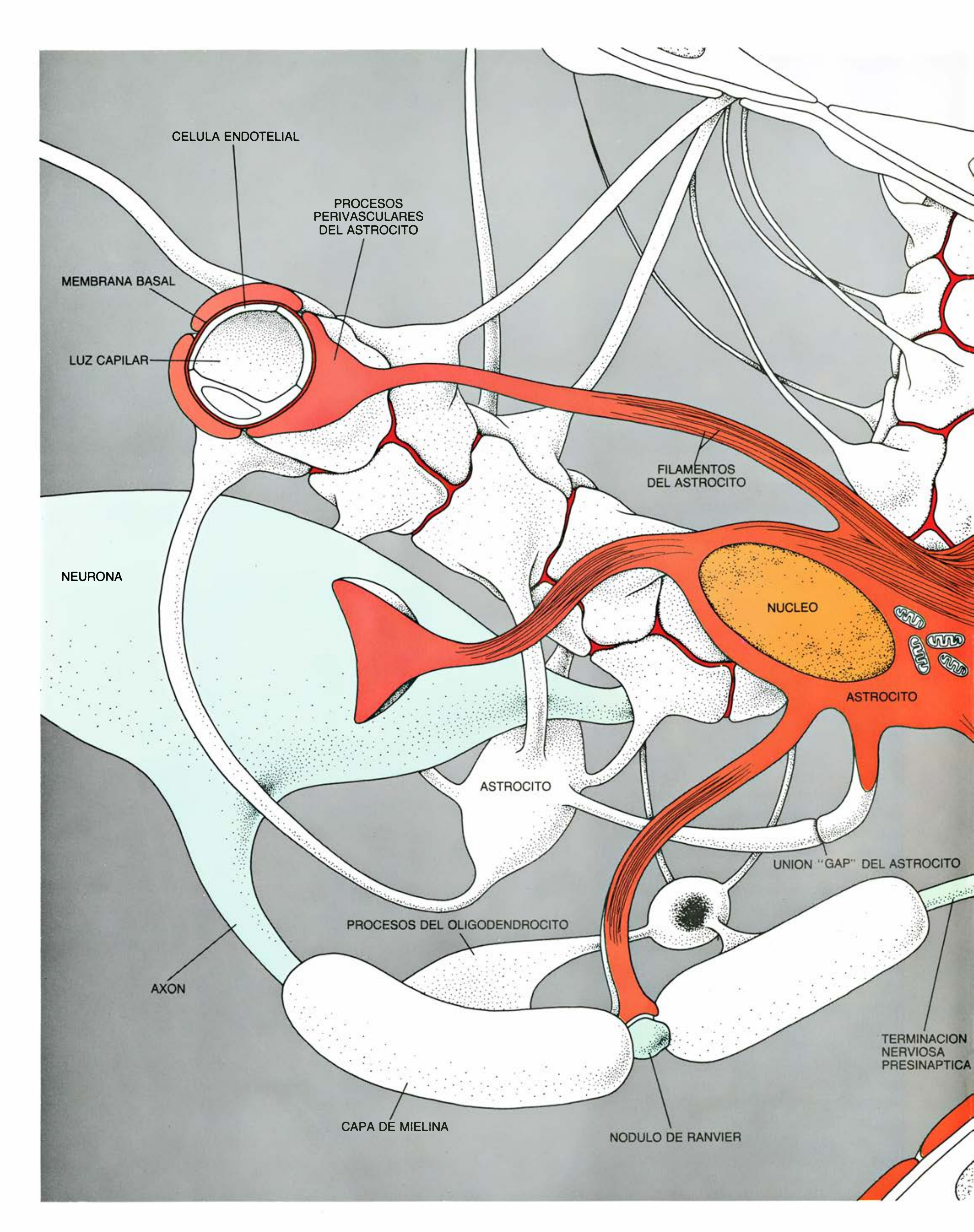
En este sistema, la inmensa mayoría de las células neurogliales vienen a constituir la macroglía. Una minoría exigua, que no deriva del tejido nervioso, se denomina microglía. A su vez, la macroglía se subdivide en astrocitos y oligodendrocitos. Se sabe que los oligodendrocitos sintetizan la mielina que cubre los axones de las neuronas en la materia blanca del cerebro. (De hecho, confiere a la materia blanca su coloración característica, que la distingue de la materia gris.) Los astrocitos se presentan en dos formas principales: astrocitos fibrosos, que se encuentran en la materia blanca, y astrocitos protoplásmicos, localizados en la materia gris. (Podríamos enumerar más subtipos.) A pesar de la dispar estructura anatómica de las distintas clases de astrocitos, seguimos sin conocer todavía las diferencias funcionales; lo que quizá no sorprenda si se tiene en cuenta que apenas estamos empezando a desentrañar las funciones generales de las células de la astroglía.

El avance de los últimos 15 años en el conocimiento de las funciones de los astrocitos debióse, en parte, al descubrimiento, a principios de los setenta, de la PAFG. Esta proteína ácida, fibrilar y glial (de ahí las siglas), es un componente de los filamentos gliales intermedios que encontramos en el citoplasma de los astrocitos; esos filamentos intervienen, a su vez, en el citoesqueleto que dota a la célula de su forma general (como sucede en la mayoría de las células). La PAFG, aislada por Lawrence F. Eng y Amico Bignami, de la Universidad de Stanford, se encuentra exclusivamente en los astrocitos; resulta, por tanto, un marcador inestimable para identificar esas células en muestras de tejido y en cultivos. Muchos datos sobre la función de los astrocitos que irán apareciendo en este artículo proceden del trabajo con cultivos puros de astrocitos, identificados como tales en virtud de la presencia de la PAFG.

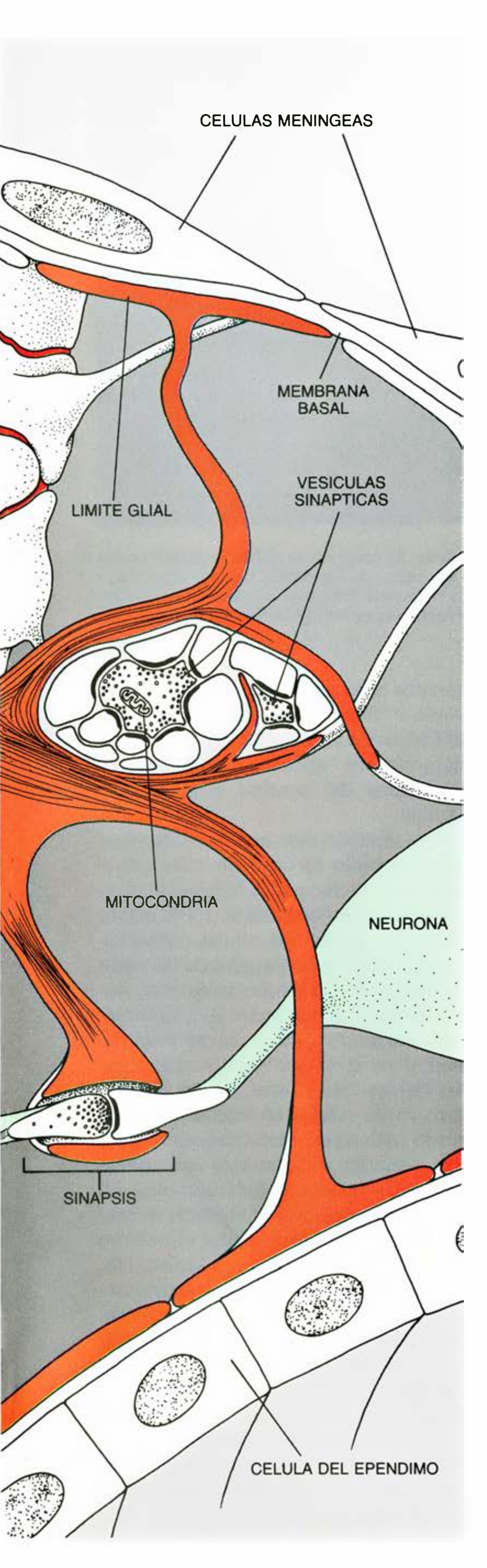
Los resultados de dicho trabajo sugieren que los astrocitos cumplen múltiples misiones activas en el mantenimiento de la fisiología normal del cerebro. Así, se les reconoce un papel decisivo en el metabolismo del glutamato y del ácido gamma-aminobutírico (GABA), importantes neurotransmisores de tipo excitador e inhibidor, respectivamente. Para que la red neuronal funcione debidamente, hay que eliminar esos transmisores, una vez se hayan vertido al espacio sináptico (entre neuronas). Sabemos ya que ciertas moléculas neurotransmisoras eliminadas alcanzan los astrocitos. Allí, GABA y glutamato se metabolizan para formar glutamina. Este aminoácido sirve, a su



1. ASTROCITOS procedentes del tejido de la retina del gato. Deben el color verdoso a su emisión de fluorescencia. El colorante fluorescente estaba unido a un anticuerpo de la PAFG, proteína específica de los astrocitos. Merced a las fibras radiadas, estas células interactúan con las neuronas, los capilares cerebrales y otras células. La microfotografía es obra de Andreas Karschin, Heinz Wässle y Jutta Schnitzer, del Max Planck. El aumento es de unos 300 diámetros.



2. COMPLEJIDAD DE LAS RELACIONES que establecen astrocitos y otras células, esquematizadas aquí en una parte del tejido cerebral. Los procesos de los astrocitos rodean a los capilares cerebrales; parece que intervienen en la inducción de la barrera hematoencefálica, que evita que las sustancias hidrosolubles pasen de los capilares al cerebro. Los astrocitos establecen también su propios contactos con las neuronas. Se encuentran en las cercanías de ciertas sinapsis (los espacios donde se liberan los neurotransmisores); captan y metabolizan neurotransmisores. Los astrocitos llegan hasta las células que forran los



ventrículos (cavidades llenas de líquido en el centro del cerebro) y hasta las meninges (las membranas que recubren el cerebro). Los oligodendrocitos despliegan fibras que cubren ciertos axones con mielina.

vez, de materia prima para sintetizar nuevos neurotransmisores.

A principios de los años cincuenta, y con el soporte de la doctrina bioquímica avanzada por Heinrich Waelsch y Soll Berl, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, se demostró la transformación de una fracción pequeña del glutamato cerebral en glutamina; el resto seguía otras rutas metabólicas sin conexión. Ciertas observaciones indirectas denunciaban la posibilidad de que las células gliales sintetizaran glutamina. Uno de nosotros (Norenberg) y sus colaboradores obtuvieron la confirmación directa de esta hipótesis, al demostrar que la glutamina-sintetasa, enzima responsable de la formación de glutamina, se encontraba exclusivamente en los astrocitos. Estas células captan GABA y glutamato y los transforman en glutamina. Una vez sintetizada, la glutamina llega a las neuronas, donde se convierte, verosímilmente, en el precursor principal del GABA y del glutamato en las células que utilizan esos transmisores.

Equilibrio iónico

Si los neurotransmisores son cruciales para la función cerebral, no menos decisiva resulta la composición iónica de la región que rodea las neuronas; ahí los astrocitos desempeñan también un papel fundamental. La importancia de los iones estriba en el equilibrio y el flujo de estas moléculas cargadas eléctricamente a través de la membrana neuronal; equilibrio y flujo que generan el potencial de acción que transmite el impulso nervioso. Responsable particular del potencial de acción es el flujo de los iones sodio y potasio (cargados positivamente); los niveles de estos iones (de potasio, sobre todo) deben estar regulados muy finamente en el espacio que rodea las neuronas.

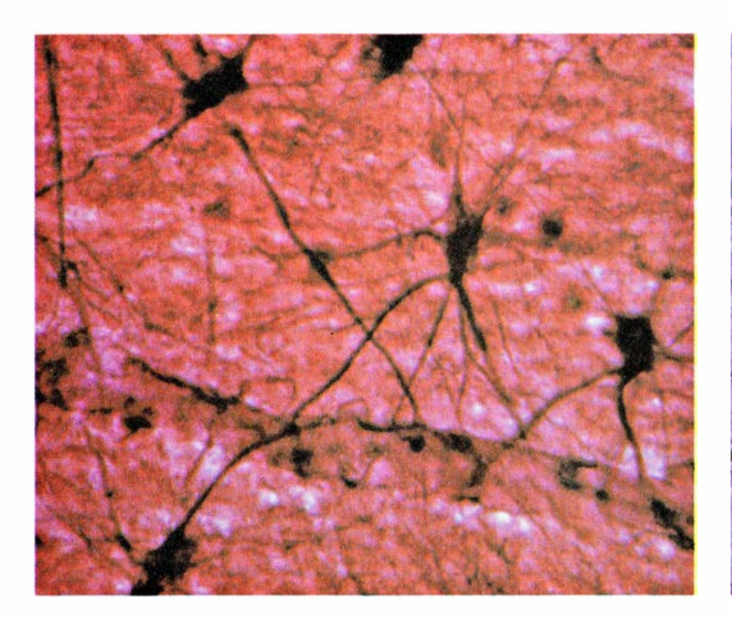
En la mayor parte del resto del organismo, los iones externos residen en el fluido del espacio extracelular. Cuando las primeras microfotografías electrónicas revelaron que los procesos astrocíticos (fibras) ocupaban todo el espacio existente alrededor de las neuronas, algunos investigadores pensaron que los astrocitos desarrollarían en el cerebro una función equivalente a la del espacio extracelular en el cuerpo. Pero esa hipótesis cayó. A mediados de los sesenta, Stephen W. Kuffler, John G. Nicholls y Richard K. Orkand, de la Facultad de Medicina de Harvard, estudiando las células gliales del nervio óptico de los anfibios, descubrieron que esas células carecían de la alta concentración de sodio propia del espacio extracelular. Al contrario, lo mismo que las neuronas, las células gliales tenían una elevada concentración interna de potasio.

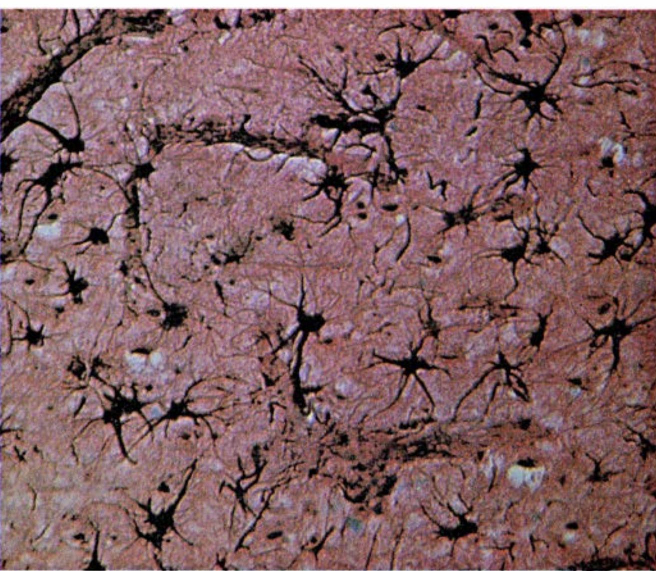
Observaciones de ese tenor desembocaron en la noción de "amortiguación espacial de potasio" por culpa de los astrocitos. Según esa hipótesis, los astrocitos retiran de la neurona el potasio sobrante del espacio extracelular procedente de la actividad neuronal. La fuerza determinante del flujo es el aumento local del potasio extracelular instado por la actividad de las neuronas. En la zona donde se ha localizado el incremento del ion, la membrana del astrocito adquiere más carga positiva. La diferencia de potencial eléctrico entre esa región y otras más distantes provoca un flujo en el interior de la célula glial que transporta el ion potasio lejos de su lugar de liberación.

Eric A. Newton, del Instituto de Investigación Ocular perteneciente a la Fundación de la Retina, de Boston, acaba de publicar algunos hallazgos que apoyan la idea de la amortiguación espacial de potasio para cierto tipo de astrocito: la célula de Müller, que se encuentra en la retina. Por su lado, los estudios con técnicas de criofracturación han demostrado, en puntos de la superficie de la membrana del astrocito, una alta concentración de estructuras que podrían ser canales de potasio. Pero continuamos sin conocer la función real de estructuras geométricas tan curiosas.

Al mantener el equilibrio de potasio adecuado, los astrocitos aseguran un ambiente idóneo para las neuronas. Hasta ahora, lo señalábamos al principio, veníase contemplando la función del cerebro desde el espejo de la actividad neuronal; veíase, asimismo, en las propiedades de las neuronas una categoría superior a la ocupada por los astrocitos. Los últimos trabajos desmienten esa pretensión y demuestran que las propiedades de ambos tipos de células se superponen bastante.

El refinamiento de las respuestas neuronales en el cerebro se atribuye, en buena medida, a la acción de los neurotransmisores sobre los receptores, proteínas complejas que se insieren en la superficie de las membranas celulares. Cuando los neurotransmisores se unen a sus receptores específicos en la membrana neuronal, producen un amplio abanico de efectos porque los receptores están conectados con los ca-





3. TINCIONES CON METALES, que posibilitaron la identificación individual de los astrocitos en el microscopio óptico. En ambas fotografías se muestran astrocitos marcados con una tinción de sublimado de oro. En la de la izquierda se ven astrocitos normales cuyas fibras terminan en un vaso sanguíneo que cruza la imagen de derecha a izquierda. La fotografía de la derecha muestra tejido cerebral "postmortem" de un enfermo de neurosífilis. Hay más astrocitos de lo normal y presentan formas aberrantes. Las microfotografías, realizadas por Lowell W. Lapham, están aumentadasunas 300 (*izquierda*) y 200 veces (*derecha*).

nales iónicos de la membrana y con el mecanismo de liberación de segundos mensajeros en el interior celular. En lo concerniente a los astrocitos, reviste gran interés que muchos receptores y segundos mensajeros, identificados en un principio en las neuronas, se descubran ahora en las células de la astroglía.

En ese ámbito, el receptor habitual de los astrocitos es del tipo beta-adrenérgico. Se une al neurotransmisor norepinefrina, desencadenando en la célula un aumento importante de un segundo mensajero llamado monofosfato de adenosina cíclico (AMPc). En 1972, Alfred G. Gilman, de la Universidad de Virginia, y Bruce Schrier, del Instituto Nacional de la Salud, describieron este fenómeno en cultivos de células gliales. Ken D. McCarthy y sus colaboradores, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, acaban de determinar la presencia de receptores beta-adrenérgicos en astrocitos aislados. Otros estudios muestran que los astrocitos tienen receptores para la mayoría de los neurotransmisores. Aunque la función de dichos receptores persiste sin acotarse, su presencia en los astrocitos implica que estas células, lejos de ser elementos estructurales pasivos, responden a las condiciones cambiantes del cerebro con la versatilidad con que puedan hacerlo las neuronas.

Poco a poco, durante más de una década, se ha ido reconstruyendo el papel plural de los astrocitos en la fisiología del cerebro. Pero hoy suscita mayor interés otro dominio que se ha venido investigando durante el mismo período: el desarrollo cerebral. Hace unos veinte años, se demostró que los astrocitos de la glía radial intervenían de forma decisiva en el desarrollo embriológico del cerebro, como ya sugiriera, un siglo antes, Wilhelm His, eminente embriólogo suizo. Las células astrogliales tejen una red estructural a modo de andamio, que permite la emigración de las neuronas desde sus puntos de origen en el sistema nervioso en desarrollo hasta sus destinos finales en el cerebro maduro.

Una red estructural

Pasko Rakic, de la Facultad de Medicina de Harvard, observó dicho efecto en la célula granular, un tipo de neurona, del cerebelo de mono. Las células granulares emigran hacia el interior desde las capas externas del cerebelo en desarrollo, sosteniéndose en las largas fibras que emiten células gliales radiales de la glía de Bergmann. En una importante serie de experimentos, Jerry Silver, de la Universidad de Case Western Reserve, ha demostrado, en el cerebro del ratón, que un "cabestrillo" de astrocitos dirige el crecimiento de los axones de una parte del cerebro a la otra, formando el cuerpo calloso (el principal tracto de fibras nerviosas que conecta los dos hemisferios cerebrales). En los animales que carecen del cabestrillo glial, el cuerpo calloso no se forma. Pero, si implantamos una pieza de material filtrante de plástico con astrocitos en crecimiento, los axones volverán a desarrollarse. A la larga, esos hallazgos podrían aplicarse a la regeneración de axones segmentados o lesionados del cerebro o la médula espinal.

Una función más que en el dominio del desarrollo se atribuye a los astrocitos es la de inducir la formación de la barrera hematoencefálica. En la mayor parte del cuerpo, las células endoteliales que revisten las paredes de los vasos capilares están trabadas laxamente; dejan así que las sustancias hidrosolubles más pequeñas que se encuentran disueltas en la sangre se difundan hacia los tejidos. No ocurre eso en el cerebro, cuyas células endoteliales capilares se hallan tan estrechamente unidas que resultan virtualmente impermeables a las sustancias hidrosolubles. La barrera, creada de esa manera, es fundamental para mantener en el cerebro un medio químicamente constante, pero supone también un obstáculo para la terapia de las enfermedades cerebrales [véase "La barrera hematoencefálica", de Gary W. Goldstein y A. Lorris Betz; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1986].

Los capilares cerebrales están rodeados, casi en su integridad, por los "pies terminales" de las fibras astrocíticas, que dibujan un patrón en sierra que cubre la superficie externa de los vasos. En un primer momento, la geometría de la combinación capilar-astrocito indujo a pensar que los propios astrocitos eran los elementos que constituían la barrera hematoencefálica. Sin embar-

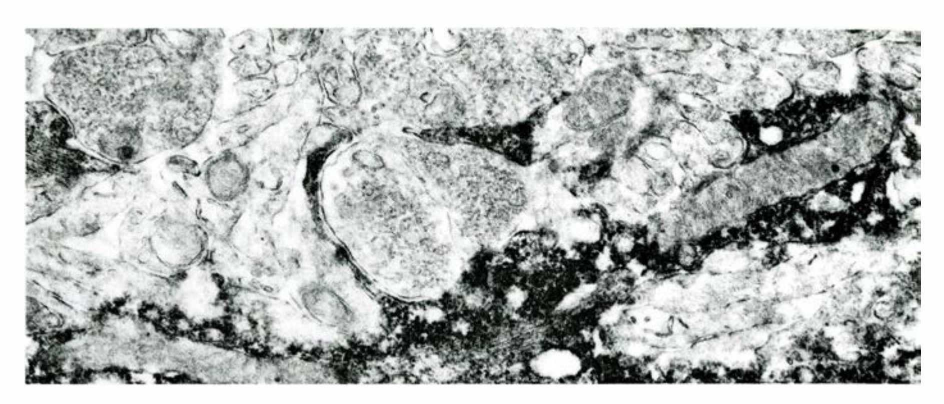
go, en las postrimerías de los años sesenta, los hábiles experimentos con trazadores electrodensos llevados a cabo por Thomas S. Reese y Milton W. Brightman, del Instituto Nacional de Alteraciones Neurológicas, de la Comunicación y de Ataques, y por Morris J. Karnovsky, de la Facultad de Medicina de Harvard, demostraron que la barrera estaba formada por las células endoteliales de la pared vascular. Lo que no impide que se atribuya a los astrocitos un papel importante: el de inducir, a las células endoteliales de los capilares cerebrales, a formar las uniones estrechas ("tight junctions") y sintetizar las enzimas características de la barrera hematoencefálica.

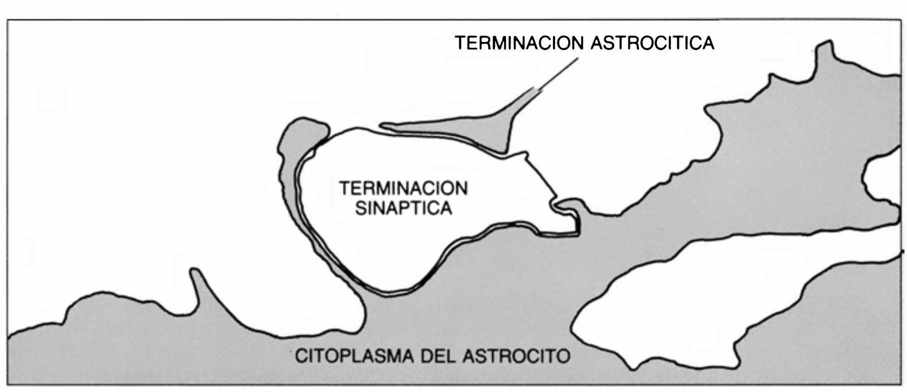
A tenor de las funciones básicas que en número creciente se viene asignando a los astrocitos, nadie debiera sorprenderse de que las alteraciones que padezcan redunden en determinadas patologías del sistema nervioso central. La verdad es que en ciertas alteraciones neurológicas sólo se aprecian anomalías en los astrocitos; en otras, los cambios en los astrocitos preceden a las anomalías de otros elementos del sistema nervioso, principalmente de las neuronas. Las lesiones cerebrales ocasionan a menudo una gliosis reactiva: un aumento del tamaño y del número de astrocitos. Los astrocitos reactivos tienen más procesos y más filamentos gliales que los ordinarios y desarrollan mayor actividad metabólica. Fruto frecuente de esa reacción es la formación de una cicatriz de glía constituida por tales astrocitos reactivos.

Cicatriz de astrocitos

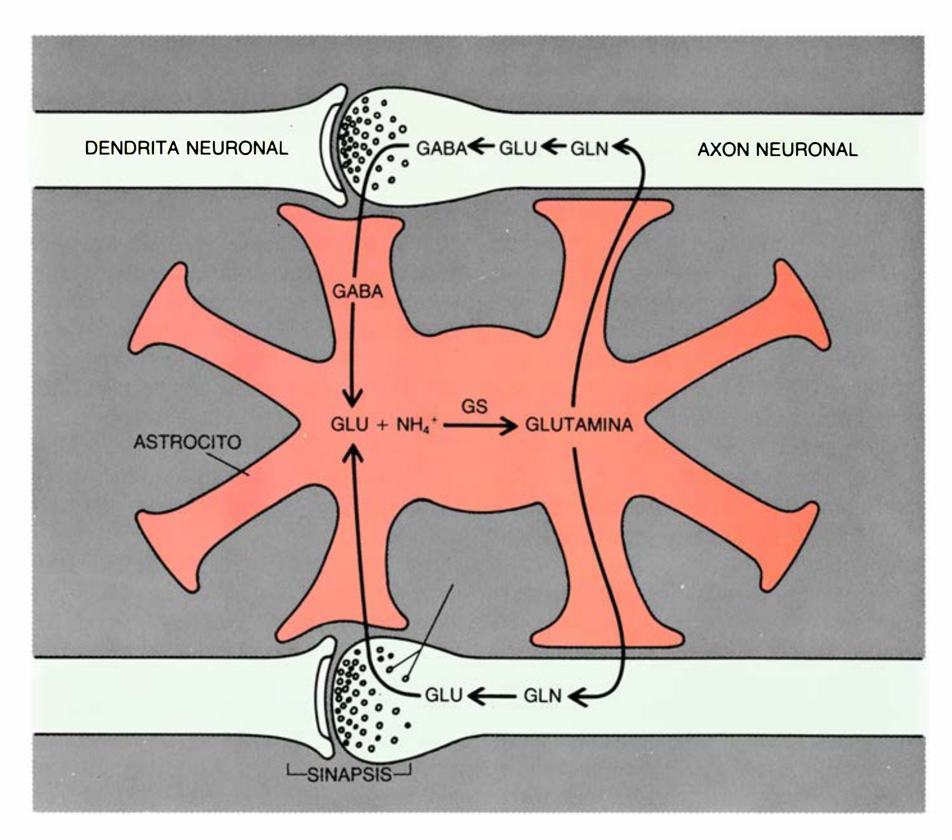
El proceso de la gliosis reactiva ha venido asociado a una formación de tejido cicatricial inerte. Durante muchos años, la mayoría de expertos en lesiones cerebrales creyeron que la cicatriz de astrocitos impedía que las neuronas reextendieran sus axones y evitaba, quizá, que los oligodendrocitos mielinizaran de nuevo los axones que habían perdido sus envolturas (como sucede, por ejemplo, en la esclerosis múltiple). Por lo que hoy sabemos, los astrocitos reactivos desempeñarían, por contra, un papel restaurador, al menos en las primeras fases.

Los astrocitos pueden liberar varios factores de crecimiento neuronales. Algunos, así el factor de crecimiento nervioso, podrían estimular la neurona entera, desarrollo del axón incluido. Por su parte, la laminina, la fibronectina y otros constituyentes de la matriz extra-





4. TERMINACION NERVIOSA SINAPTICA, rodeada por las prolongaciones astrocíticas que contienen glutamino-sintetasa, enzima cuya presencia se destaca por un producto de reacción negro. La enzima convierte el glutamato, un neurotransmisor, en glutamina. Observaciones de este tenor, llevadas a cabo por uno de los autores (Norenberg), pusieron de manifiesto que la transformación se desarrollaba en el interior del astrocito. La micrografía, cuya ampliación es de 21.000 diámetros, ha sido realizada por Norenberg.



5. METABOLISMO DEL NEUROTRANSMISOR: se lleva a cabo parcialmente en los astrocitos. El glutamato (*Glu*), un transmisor excitador, y un transmisor inhibidor llamado GABA se convierten en glutamina (*Gln*) en el astrocito por intervención de la glutamino-sintetasa (*GS*). La glutamina vuelve a las neuronas, donde se utiliza para sintetizar nuevas moléculas de neurotransmisores. Estas reacciones consumen amoníaco (NH_4^+) y, por tanto, sirven para mantener los niveles bajos de esa sustancia tóxica en el tejido cerebral.



6. CONJUNTOS GEOMETRICOS CURIOSOS. Destacan en esta microfotografía de criofractura de una sección de la membrana externa de un astrocito que rodea un capilar cerebral. Pruebas indirectas sugieren que esas aglomeraciones podrían ser canales de potasio que permitirían que los astrocitos regulasen el equilibrio iónico en el cerebro. La fotografía está aumentada unos 120.000 diámetros. La realizó Dennis M. D. Landis y Thomas S. Reese, del Instituto Nacional de Alteraciones Neurológicas, Comunicación y Ataques.

celular pueden promover y acelerar específicamente el crecimiento de los procesos neuronales. Además, como ya se ha dicho, durante el desarrollo embrionario los astrocitos proporcionan una red estructural de sostén a modo de andamio por donde las neuronas emigran hasta situarse en el lugar que les corresponde. Es muy posible que, en respuesta a la lesión, los astrocitos vuelvan a ejercer esa función y, por tanto, posibiliten la restauración de las conexiones nerviosas interrumpidas. La liberación de los diversos factores de crecimiento que activan el desarrollo de las células nerviosas habrán de intervenir, a buen seguro, en esa función restauradora.

Ahora bien, si los astrocitos cumplen una misión reparadora en el cerebro dañado, provocarán también efectos perjudiciales en cuanto se altere su funcionamiento.

En efecto, por constituir la cicatriz glial una característica de la epilepsia, se creyó durante mucho tiempo que los astrocitos participaban en el desarrollo de dicha patología. Daniel A. Pollen y Michael C. Trachtenberg, del Hospital General de Massachusetts, sugirieron que un defecto en el amortiguamiento del potasio podría rebajar el umbral de excitación de la célula nerviosa y, en consecuencia, conducir a la hiperactividad neuronal observada en la epilepsia. La hipótesis, aunque objeto de controversia todavía, resulta, sin duda, plausible.

Confirma esa participación de los astrocitos en la epilepsia el hecho de que glutamato y GABA se hallen implicados, por lo común, en el desarrollo de la enfermedad. Povel Krogsgaard-Larsen y sus colaboradores, de la Real Facultad Danesa de Farmacia en Copenhague, acaban de publicar los resultados soprendentes de su trabajo con ratones susceptibles de padecer ataques inducidos por el sonido, ataques muy similares a los epilépticos. Han descubierto que THPO, una sustancia que bloquea selectivamente la recaptación de GABA por parte de los astrocitos pero no por parte de las neuronas, salva a los ratones del ataque; moléculas similares que bloquean la recaptación de GABA en las neuronas no son protectoras.

La sugestiva huella de la intervención de los astrocitos en la génesis de la epilepsia es, sin embargo, de carácter indirecto. En el caso de otras dos patologías —la enfermedad de Parkinson y la de Huntington— manifiéstase una inculpación directa de sustancias sintetizadas por los astrocitos. El mal de Parkinson es una alteración motora entre cuyos síntomas se pueden encontrar el temblor y la rigidez. A principios de los ochenta, ciertos drogadictos por vía parenteral desarrollaron los síntomas del Parkinson, tras inyectarse droga contaminada con MPTP. Posteriormente, se demostró que el agente tóxico era, en realidad, un derivado metabólico de esa sustancia, llamado MPP^+; éste destruía cierto grupo de neuronas y provocaba la enfermedad mencionada. Una enzima perteneciente al grupo de las monoamino-oxidasas es la encargada de convertir MPTP en MPP^+. Se ha demostrado ya la presencia de la enzima en los astrocitos.

La enfermedad de Huntington

Según han podido avanzar Robert Schwarcz y sus colaboradores, del Centro de Investigación Psiquiátrica de Maryland en Baltimore, la enfermedad de Huntington podría presentar un cuadro similar. En efecto, un producto intermediario normal del metabolismo del aminoácido triptófano es el ácido quinolínico. Acido que puede actuar sobre ciertos tipos de receptores de glutamato de las neuronas y acabar con éstas. Ahora bien, se ha comprobado que la enzima que sintetiza el ácido quinolínico (de nombre 3-HAO) predomina en los astrocitos, si no es exclusiva de los mismos. En cuanto hubiera una cantidad anómala de esta enzima en el astrocito, podría producirse un exceso del ácido quinolínico tóxico, que sentenciaría la muerte de determinadas neuronas y, en consecuencia, la aparición de los síntomas de la enfermedad de Huntington.

La intervención de los astrocitos en la patología no se limita, en absoluto, a la generación de la enfermedad. Antes bien, parece evidente su participación en la respuesta inmune del cerebro. La falta de sistema linfático en el cerebro, junto con la presencia de la barrera hematoencefálica (que impide el paso de muchas células y agentes inmunes), indujo a suponer que el cerebro era un órgano aislado de los efectos del sistema inmune. El trabajo de Adriano Fontana y sus colaboradores, del Hospital Universitario de Zurich, ha cambiado radicalmente ese punto de vista al mostrar cómo los astrocitos (al menos en cultivo) son células accesorias que mediatizan las reacciones inmunes en el cerebro.

Cuando realizan esta función, los astrocitos actúan como células presentadoras de antígenos (CPA). Muy conocidas fuera del cerebro, se cuentan entre esas células los monocitos, los macrófagos y las células de Langerhans de la piel. La combinación de un antígeno (una proteína extraña) y ciertas moléculas endógenas (como las que presen-

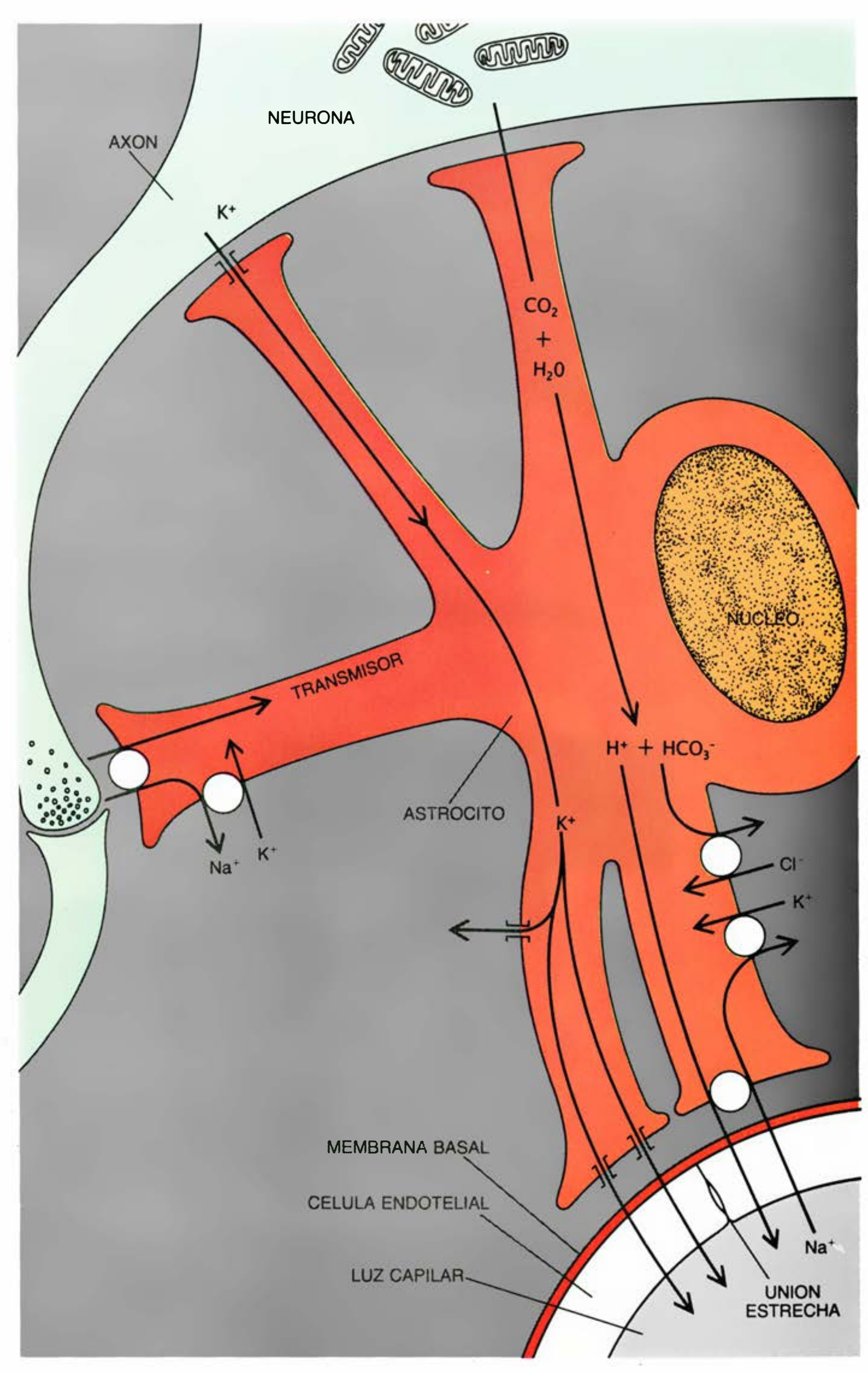
tan las CPA) estimula a otras células, generalmente a los linfocitos *T*, que reaccionan y destruyen el cuerpo invasor. Parte del repertorio genético de la célula, el llamado Complejo Mayor de Histocompatibilidad o CMH, determina las moléculas endógenas que se presentan con el antígeno.

Las moléculas del CMH se manifiestan en dos formas: clase I y clase II. Se ha demostrado que ambos tipos se hallan en los astrocitos, dotándoles de las funciones que se asignan a las CPA. Las proteínas del CMH de clase I son necesarias para que las células *T* asesinas encuentren y destruyan sus objetivos. Se sabe, desde hace algún tiempo, que en las células de la astroglía se pueden sintetizar esas moléculas. Más recientemente, Paul Massa y Volker ter Meulen, de la Universidad de Würzburg, y Fontana han demostrado que los astrocitos de algunas especies están capacitadas para generar las moléculas del CMH de la clase II; capacidad que puede guardar relación con la esclerosis múltiple y otras patologías en las que interviene el sistema inmune.

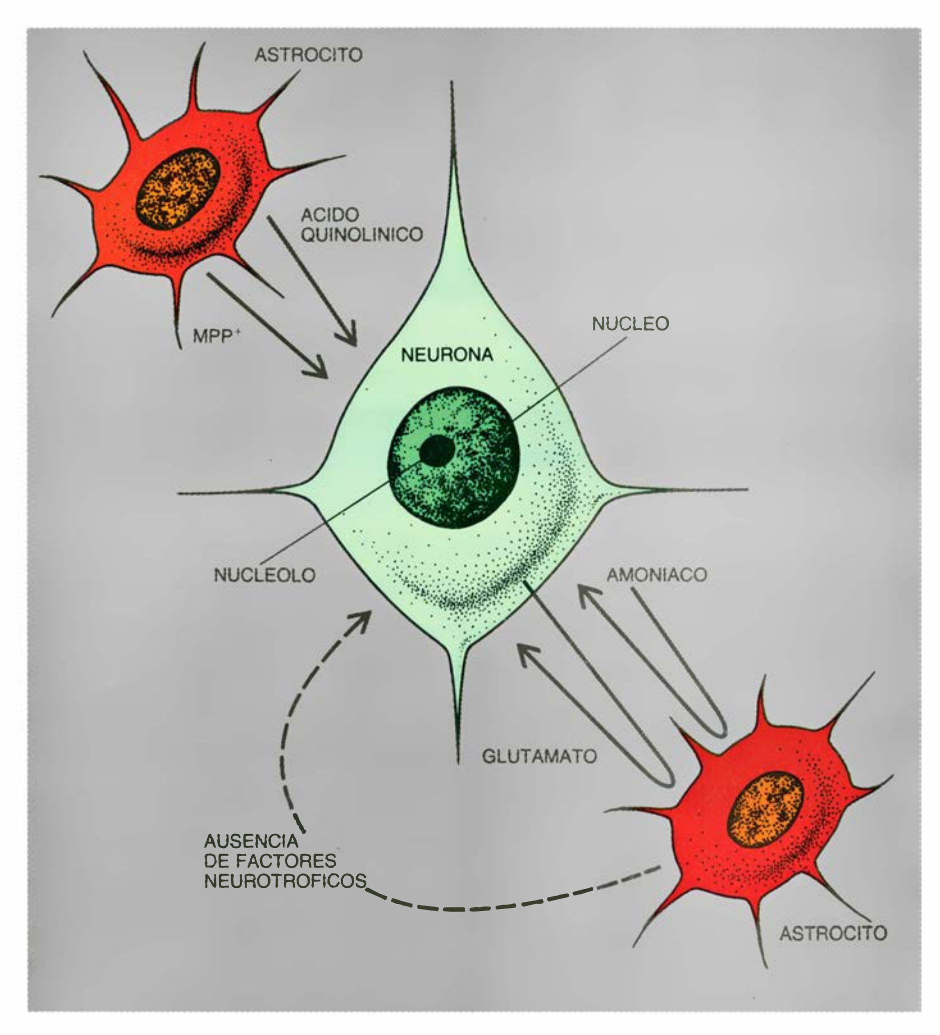
Viene de lejos la sospecha de que la esclerosis múltiple debíase al propio sistema inmune del paciente, que atacaría ciertos axones mielinizados. La encefalomielitis alérgica experimental (EAE) proporciona un modelo de laboratorio de la alteración; podemos provocarla inyectando en un animal tejido cerebral homogeneizado o proteína básica mielínica y purificada que hemos extraído de otro animal. El tejido inyectado dispara, se presume, una respuesta inmune que termina por destruir los tejidos sanos. No deja de ser curioso que la reacción sea peculiar de cada especie e incluso de cepas pertenecientes a una misma especie: las ratas de Lewis son susceptibles, mientras que las de Brown Norway no lo son.

La distinta capacidad para desarrollar la EAE podría reflejar, a su vez, variaciones entre los astrocitos de cepas diferentes. Massa y sus colaboradores han demostrado que los astrocitos de las ratas de Lewis sintetizan las proteínas de la clase II del CMH; los de las ratas de Brown Norway no pueden hacerlo. Por tanto, la capacidad de los astrocitos para sintetizar las moléculas de la clase II del CMH podría resultar determinante, al menos, para un tipo de respuesta inmune anormal. Estudios en los que anticuerpos específicos para las moléculas de la clase II aliviaban notablemente el daño estructural producido en la EAE apoyaron esa idea. Si la capacidad de sintetizar las proteínas del CMH que los astrocitos muestran resulta esencial para una respuesta autoinmune como la que observamos en la EAE, cabe, asimismo, esperar que estas células se hallen implicadas en las respuestas del cerebro ante la presencia de antígenos extraños.

Todos esos hallazgos podrían desembocar en una aproximación decisiva a la patogenia de la esclerosis múltiple. Mientras llega ese momento, las investigaciones sobre la presencia frecuente de astrocitos hinchados y acuosos en las primeras fases de la lesión cerebral pueden tener un rendimiento clínico más inmediato. Un grupo de la Facultad de Medicina de Albany, en el que se encontraban Kevin D. Barron, Robert S. Bourke y Louis R. Nelson, junto con uno de los firmantes de este artículo (Kimelberg), dedicó varios años



7. PROCESOS DE TRANSPORTE IONICO supuestos en los astrocitos. Ilustramos en esta figura varios procesos que capacitan al astrocito para intercambiar sodio (*Na^+*), potasio (*K^+*), bicarbonato (*HCO_3^-*), cloruro (*Cl^-*) y protones (*H^+*) con otras células vecinas, entre ellas las neuronas; el dióxido de carbono (*CO_2*), a diferencia de los iones y las moléculas con carga, entra y sale de la célula con entera libertad (*arriba*).



8. LOS ASTROCITOS PUEDEN DAÑAR LAS NEURONAS por procesos directos e indirectos. Un producto metabólico artificial de los astrocitos (el MPP^+) y uno natural (el ácido quinolínico) se han relacionado con la aparición de la enfermedad de Parkinson y de la enfermedad de Huntington, respectivamente. A la inversa, si se altera el metabolismo de los astrocitos, se pueden acumular sustancias potencialmente tóxicas, como el amoníaco y el glutamato, o puede ocurrir que la célula deje de liberar los factores neurotróficos necesarios para el mantenimiento y crecimiento correctos de las células nerviosas. (Dibujo de Seward Hung.)

al estudio del significado de la hinchazón de los astrocitos en determinado tipo de lesión cerebral. Descubrimos que, en animales de laboratorio, la hinchazón de los astrocitos remitía y caía la mortalidad asociada con el trauma cerebral aplicando una sustancia adiurética derivada de un grupo de diuréticos de asa; esos componentes se llaman así porque actúan en el asa de Henle del riñón. Edward J. Cragoe, Jr., de los Laboratorios de Investigación Merck Sharp & Dohme, sintetizó el derivado adiurético en cuestión.

La hinchazón de los astrocitos

¿Cómo procede ese compuesto? Interviene, eso parece, en los sistemas de transporte iónico a través de la membrana del astrocito. Recuérdese que mencionábamos más arriba la existencia de canales de potasio en la membrana del astrocito, pero no bastan para explicar la complejidad del sistema de transporte. Hay otros sistemas, algunos de los cuales vehiculan iones a través de uniones. Citemos, a modo de ejemplo, el sistema acoplado de transporte e intercambio de iones sodio y protones (iones hidrógeno), o el sistema de intercambio de iones cloruro y bicarbonato.

El grupo de Albany ha sugerido que la hinchazón de la astroglía podría deberse al aumento de la actividad de esos dos sistemas de transporte e intercambio iónico, que acumularían iones sodio y cloro en los astrocitos. En el proceso de ósmosis, el agua atraviesa la membrana celular para eliminar cualquier gradiente de concentración neto de sustancias con carga, o sin ella, que no pueden cruzar libremente dicha membrana. Si se acumulara sodio y cloro en el interior del astrocito, habría cierto volumen de agua "osmóticamente obligado" a concentrarse también allí, provocando la hinchazón de la célula. Ricardo Garay, del Hospital Necker de París, ha corroborado esa hipótesis con el descubrimiento de que el derivado diurético inhibía el sistema de transporte iónico que controla el intercambio de iones cloruro y bicarbonato.

El estudio del proceso de hinchazón de la astroglía saca a la luz la decisiva participación de los astrocitos en las patologías que se originan directamente en el cerebro. También podrían tener una función de igual relieve cuando la alteración primaria se localiza fuera del sistema nervioso central. Los enfermos de cirrosis hepática severa desarrollan, a menudo, síntomas neurológicos que van desde cambios ligeros de la personalidad hasta estupor y coma; alteraciones que, en su conjunto, constituyen la encefalopatía hepática, siendo el síndrome de Reye un ejemplo particular. Aunque desconocemos por qué mecanismos llega la enfermedad del hígado a afectar adversamente la función cerebral, se admite la acción mediadora de toxinas que circulan en la sangre, habida cuenta de que el hígado —el principal órgano desintoxicador del cuerpo— está incapacitado. Las toxinas pueden atravesar la barrera hematoencefálica y entorpecer el metabolismo cerebral.

Entre las toxinas inculpadas en este proceso se citan el amoníaco, los ácidos grasos de cadena corta y los mercaptanos. Parece que las tres sustancias actúan sobre los astrocitos. Muchos de los enfermos que mueren por encefalopatía hepática ofrecen, como única patología cerebral observable, astrocitos aberrantes dotados de un gran núcleo y pocas fibras. Estas alteraciones reciben la denominación de cambios tipo II de Alzheimer, en honor del neurólogo alemán Alois Alzheimer (del que también toma el nombre la enfermedad de Alzheimer).

Un círculo vicioso

La idea según la cual los astrocitos serían los principales afectados parte de la acción de las toxinas mencionadas sobre los mismos. Además, la presencia del amoníaco podría poner en marcha un círculo vicioso. En el ciclo, ya descrito, en el que la glutamina se sintetiza a partir del glutamato en las células de la astroglía se consume amoníaco. Esa serie de reacciones de síntesis levanta la primera barrera de protección del cerebro contra el acúmulo del producto tóxico. Con los astrocitos lesionados, el amoníaco empieza a acumularse en los tejidos cerebrales y agrava el daño. La encefalopatía hepática parece ser, pues, una alteración

cuyos primeros afectados son los astrocitos, fenómeno que, a su vez, puede desencadenar la alteración de la función nerviosa.

Aunque muchos de los trabajos experimentales que hemos descrito se centran en la función fisiológica de los astrocitos, estas células podrían verse involucradas en ciertas alteraciones psiquiátricas. Los estudios de Fritz A. Henn, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y de Leif Hertz y colaboradores, de la de Saskatchewan, han llamado la atención sobre dicha posibilidad. Muchas drogas psicoactivas que se prescriben (medicación ansiolítica y antidepresivos incluidos) interaccionan con receptores que se alojan, lo sabemos ya, en los astrocitos, o bien influyen en los procesos metabólicos que se desarrollan en esas células. Aunque la participación de los astrocitos en las alteraciones psiquiátricas pertenecen todavía al terreno de la conjetura, debe convertirse en campo feraz de futuras investigaciones.

La incursión en las alteraciones psiquiátricas —con la implicación clara de emociones e ideas— nos devuelve al punto de partida. Empezamos señalando que la mayoría de los estudios del funcionamiento cerebral se habían centrado en las neuronas. Hoy se está prestando ya alguna atención a las células gliales, los astrocitos en particular. Es inmediato que la vieja creencia que las suponía células esencialmente inertes, sin más cometido que servir de soporte físico, no puede mantenerse. Las investigaciones en curso han revelado nuevas funciones, sorprendentes además. Aquellas formas de singular belleza que Cajal conoció, y a quien cautivaron, desempeñan, podemos afirmarlo ahora, una actividad funcional. Ha llegado el momento de conceder a los astrocitos igual trato que a las neuronas, lo mismo en el cerebro normal que en el cerebro patológico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ASTROCYTES. L. Hertz en *Handbook of Neurochemistry*, editado por Abel Lajtha. Plenum Press, 1982.

PRIMARY ASTROCYTE CULTURES—A KEY TO ASTROCYTE FUNCTION. H. K. Kimelberg en *Cellular and Molecular Neurobiology*, vol. 3, n.º 3, págs. 1-16; marzo de 1983.

ASTROCYTES. Editado por Sergei Fedoroff y Antonia Vernadakis. Academic Press, 1986.

BIOCHEMICAL PATHOLOGY OF ASTROCYTES. Editado por M. D. Norenberg, L. Hertz y A. Schousboe. Alan R. Liss, Inc., 1988.

GLIAL CELL RECEPTORS. Editado por H. K. Kimelberg. Raven Press, 1988.

Láseres de electrones libres

Los electrones pueden impartir energía a las ondas luminosas con la ayuda de un campo magnético. El intenso haz resultante, capaz de analizar las estructuras cristalinas, podría destruir misiles espaciales

Henry P. Freund y Robert K. Parker

En teoría, el láser de electrones libres es una fuente luminosa muy versátil. Es eficiente, puede sintonizarse a casi cualquier longitud de onda, funciona a potencias elevadas y, desde luego, produce radiación coherente. Los láseres de gas y de estado sólido, por contra, pueden generar luz sólo a longitudes de onda específicas, correspondientes a las transiciones energéticas de sus medios. Los láseres de color, sintonizables dentro de una banda estrecha, precisan de un láser de gas para el bombeo óptico y funcionan exclusivamente a niveles de potencia bastante bajos. Además, mientras los láseres convencionales transforman en luz sólo una pequeña fracción de su energía de entrada, los de electrones libres ofrecen un rendimiento potencial de hasta el 65 por ciento. Los láseres de electrones libres se han utilizado en experimentos que van desde la física del estado sólido hasta la biología molecular; y se están ya desarrollando algunos prototipos para misiones de defensa estratégica, incluso como armas de energía dirigida.

En la práctica, sin embargo, los láseres de electrones libres (o LEL) no han salido de las paredes del laboratorio. La mayoría se han construido en torno a los aceleradores de electrones disponibles. Aunque los LEL están capacitados para emitir luz a distinta longitud de onda —desde las microondas hasta el ultravioleta—, los investigadores han encontrado dificultades para operar con ellos en las longitudes de onda de la franja visible del espectro o más cortas. Pero los láseres de electrones libres han comenzado a cobrar autonomía: se están diseñando aceleradores para sus necesidades específicas e instalando laboratorios para que los investigadores de otras disciplinas dispongan de esta nueva fuente de luz intensa.

HENRY P. FREUND y ROBERT K. PARKER colaboran en la investigación de los láseres de electrones libres. Freund, físico que investiga en la empresa Corporación Internacional de Ciencia Aplicada, obtuvo su doctorado por la Universidad de Maryland en College Park, en 1976; desde entonces ha trabajado en la generación de radiación coherente. En 1980 se centró en los LEL, junto con otros físicos del Laboratorio de Investigación Naval de Estados Unidos. Parker es jefe de la rama de electrónica de vacío de la división de ciencia electrónica y tecnología del Laboratorio de Investigación Naval. Ha trabajado sobre la generación de radiación coherente en plasmas. Parker obtuvo su doctorado en ingeniería nuclear por la Universidad de Nuevo México, en 1973.

En un láser de electrones libres, los electrones de alta energía emiten radiación coherente; no se apartan, en eso, del láser convencional; ahora bien, tal como sugiere su nombre, los electrones viajan en un haz a través del vacío, en vez de permanecer ligados a los átomos del medio. Por hallarse libres los electrones, la longitud de onda de la luz que emiten no está limitada a un valor específico y correspondiente a una transición permitida entre dos niveles energéticos de un átomo. En términos mecánico-cuánticos, los electrones emiten luz en su desplazamiento desde un nivel energético del continuo hasta otro. El proceso, sin embargo, recibe cabal explicación en el marco de la teoría electromagnética clásica.

La luz se produce mediante una interacción entre tres elementos: el haz de electrones, una onda electromagnética que viaja a través de la cavidad del láser, en la misma dirección que los electrones, y un campo magnético periódico en el espacio, producido por un conjunto de imanes llamado vibrador. El campo magnético del vibrador actúa sobre los electrones, de manera que éstos ceden energía a la onda electromagnética. La energía que los electrones ceden amplifica la onda que, entonces, es emitida por el láser.

Cuando una onda luminosa avanza a través de un campo magnético ondulante, pensemos en el producido por el vibrador, las variaciones espaciales del campo del vibrador se combinan con las del campo electromagnético de la onda luminosa para producir una onda pulsante que, en esencia, viene a constituir un patrón de interferencia entre las dos. La onda pulsante tiene la misma frecuencia que la onda luminosa, pero su número de ondas (que indica el número de longitudes de onda en una distancia dada) es la suma del número de ondas del haz luminoso y del número de ondas del campo del vibrador.

La onda pulsante, que posee la misma frecuencia que la onda luminosa, tiene un número de ondas mayor (y, por tanto, una longitud de onda más corta); viaja, pues, más lenta que la onda luminosa y, se la llama, con justicia, onda ponderomotriz. El campo electromagnético de la onda ponderomotriz es la combinación de la onda luminosa y del campo estacionario del vibrador; se trata, por ello, del campo real que un electrón ve cuando pasa a través del láser de electrones libres. Si el electrón avanza a la misma velocidad que la onda, se encontrará con un campo constante: el de la parte de la onda con la que viaja.

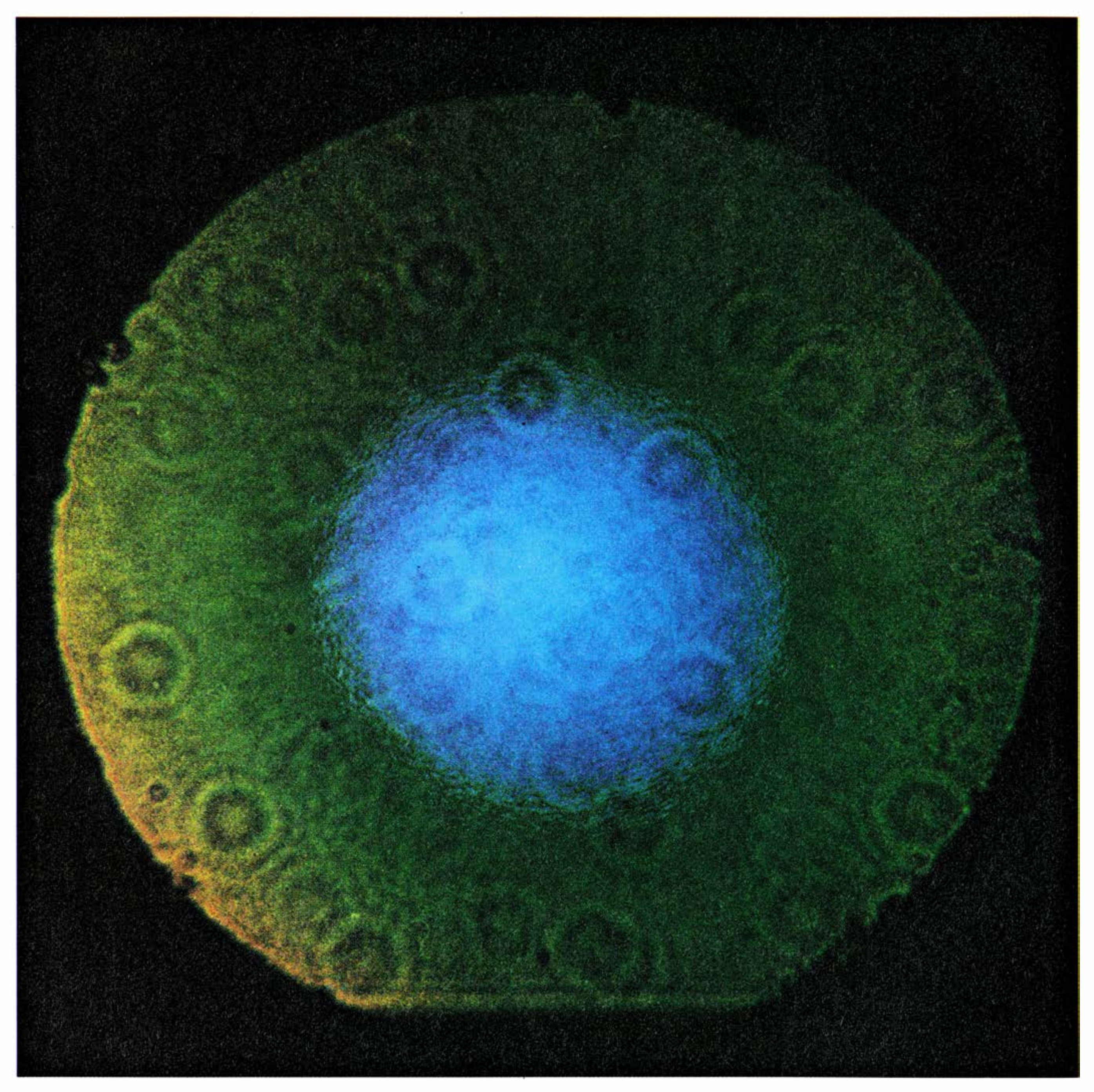
Un buen modelo de la interacción entre los electrones y la onda ponderomotriz lo descubrimos en la interacción entre los practicantes del surf y la ola que se acerca a la playa. Si los deportistas permanecen quietos en el agua, la ola que llega los elevará para dejarlos un instante después en el nivel anterior. Pero si los deportistas "montan sobre la ola", impulsándose hasta ajustarse a su velocidad, podrán ganar una apreciable cantidad de momento de la ola y ser arrastrados hacia la playa. (En el láser de electrones libres, los electrones amplifican la onda; la situación se acerca al proceder de los deportistas, "empujando" la ola y aumentando su altura.)

¿Cómo pueden un campo magnético transversal y una onda electromagnética que avanza, cuyos campos eléctrico y magnético caen perpendicularmente a la dirección de propagación, crear una fuerza axial capaz de extraer energía del haz de electrones? Un electrón que avanza por un campo magnético experimenta una fuerza que se ejerce perpendicularmente a la dirección del campo y a la dirección del movimiento. Cuando un electrón entra en el campo magnético del vibrador, experimenta una fuerza transversal y adquiere una velocidad asimismo transversal. La interacción entre la velocidad transversal inducida por el vibrador con el campo magnético de la onda electromagnética provoca una fuerza perpendicular a ambos, o sea, en la dirección axial. Tal es la fuerza ponderomotriz.

El electrón que avance más deprisa que la onda ponderomotriz viajará contra la dirección de la fuerza ponderomotriz; se le frenará. La energía total del sistema onda-partícula debe conservarse, y así la energía perdida por el electrón la gana la onda. En virtud de todo ello, la onda luminosa que pasa por la cavidad se amplifica con la energía de los electrones.

La cuantía de la amplificación depende de la diferencia entre la velocidad del electrón y la velocidad de la onda ponderomotriz, así como de la intensidad de la interacción entre el electrón y la onda. Si los electrones se mueven casi a la misma velocidad que la onda, le cederán poca energía, antes de que se frenen y dejen de adelantar a las crestas de la onda. Por otro lado, si los electrones se mueven mucho más deprisa —o mucho más despacio— que la onda ponderomotriz, la interacción entre ambos será pequeña.

Cuando electrones y onda ponderomotriz viajan juntos a través del vibrador, van perdiendo energía y decele-



1. INTENSO PULSO DE LUZ producido por el láser de electrones libres de la Universidad de París. La intensidad del campo magnético interno del LEL y la energía de los electrones que lo atraviesan determinan la longitud de onda de la luz. El color azul corresponde a la emisión láser coherente; el verde señala la emisión espontánea incoherente. Merced a la posibilidad de sintonizarse a casi cualquier longitud de onda, los LEL se abren camino en campos muy dispares.

rándose, hasta que ya no son capaces de sobrepasar las crestas de la onda ponderomotriz. La onda continúa decelerando los electrones, hasta que éstos se mueven más despacio que la onda; la siguiente cresta de la onda supera, entonces, los electrones, acelerándolos de nuevo, de manera que quedan atrapados y oscilan hacia delante y hacia atrás en los valles de la onda ponderomotriz. Cesa, en ese momento, la amplificación. El haz de electrones, de alta energía, se ha transformado en un haz agrupado de energía menor, en el que las zonas de alta densidad de electrones se alternan con zonas de baja densidad. Volviendo al ejemplo del surf, se ha sustituido un océano lleno de una concentración bastante uniforme de deportistas por otro en el que la mayoría de ellos se han "subido" a alguna ola.

La calidad del haz de electrones inicial resulta crucial para el funcionamiento de este mecanismo de captura. Cuanto más baja sea la temperatura del haz —cuanto más estrecha sea su distribución de velocidades—, mejor será el funcionamiento del láser de electrones libres. Si la dispersión de velocidades del haz es demasiado grande, muchos de sus electrones no cederán una parte significativa de su energía al ser atrapados por la onda ponderomotriz; se limitarán a acelerarse a través del vibrador, sin cambio neto de velocidad. La dispersión de velocidades aceptable depende de los parámetros concretos del haz y del vibrador. Las exigencias adquieren mayor rigor cuando decrece la longitud de onda de funcionamiento, e imponen severas dificultades para una actuación con longitudes de onda ultravioletas.

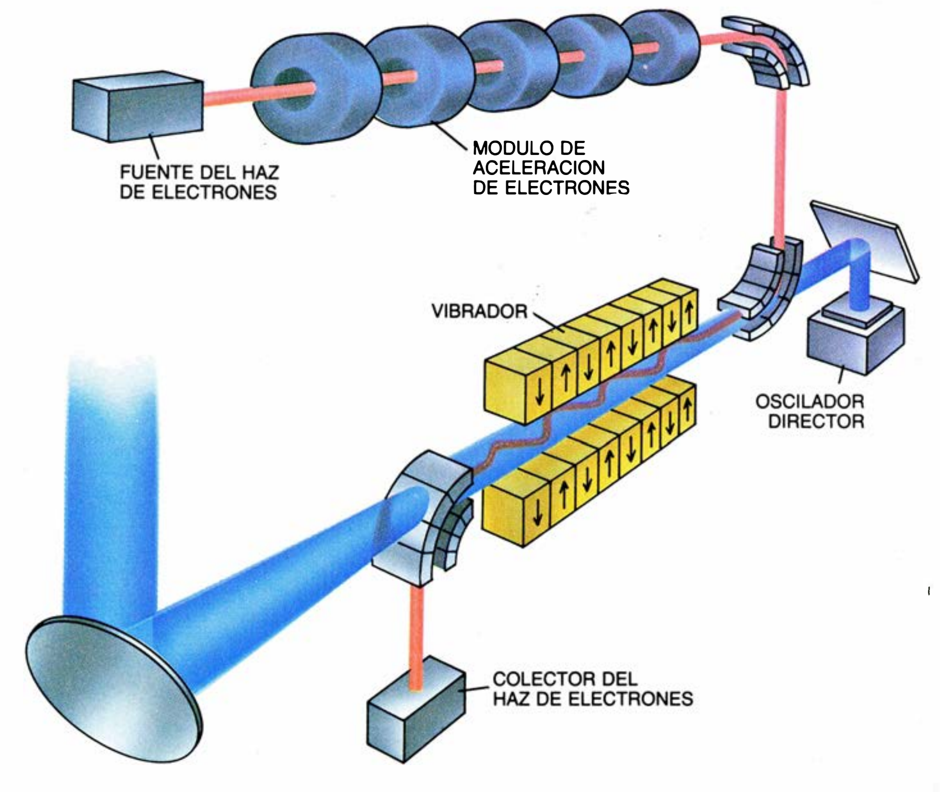
En su modo de funcionamiento más sencillo, el LEL opera como un amplificador que aumenta la potencia de una onda electromagnética en su paso por la cavidad. Un láser de electrones libres puede cumplir también otras misiones. Puede actuar como un oscilador: la onda electromagnética se refleja en los espejos de los extremos de la cavidad del vibrador, de manera que la radiación realiza múltiples viajes por el sistema, recibiendo más energía del haz de electrones en cada viaje. Puede funcionar incluso como un amplificador superradiante; en éste, el haz de electrones amplifica ondas electromagnéticas aleatorias que pasan por la cavidad del vibrador.

A pesar de la sencillez que caracteriza al principio en que se basa el láser de electrones libres, llevarlo a la práctica ha sido ya harina de otro costal. En 1951, Hans Motz, de la Universidad de Stanford, calculó el espectro de emisión de un haz de electrones en un campo magnético ondulante. El y sus colaboradores produjeron inicialmente luz incoherente azul-verdosa; más tarde, obtuvieron una amplificación coherente a longitudes de onda milimétricas. Pero no consiguieron la emisión coherente a longitudes de onda visibles por culpa de la pobre calidad de su haz de electrones.

En 1957, Robert M. Phillips, de la empresa General Electric, descubrió, por su lado, la aplicación de los campos magnéticos ondulantes a la amplificación de microondas. Desarrolló y refinó su ubitrón (contracción de "Undulating Beam Interaction") en el transcurso de los siete años siguientes, convirtiéndose en pionero de muchas líneas de diseño todavía vigentes. Un sistema generó 150 kilowatt de radiación de microondas coherente a una longitud de onda de cinco milímetros. Pero el calendario jugó en contra de Phillips: el sector de la electrónica estaba cambiando de la electrónica del vacío a la física del estado sólido y a los dispositivos mecánico-cuánticos; su empresa, la GE, dio carpetazo al desarrollo del ubitrón en 1964.

En 1975 renació el interés por el láser de electrones libres, cuando John M. J. Madey (quien acuñó el nombre de láser de electrones libres) y sus colaboradores de Stanford usaron un vibrador helicoidal y un haz de electrones proveniente de un acelerador lineal para amplificar la salida de un láser de CO_2 de 10,6 micras. Los adelantos que se habían registrado en la técnica de la aceleración de electrones y en el diseño de vibradores permitieron el éxito de Madey.

Al par que los físicos de Stanford, experimentalistas de otros laboratorios empezaron a trabajar en LEL de microondas, los sucesores del ubitrón. Aquellos proyectos, gestados en el Laboratorio de Investigación Naval, en la Universidad de Columbia y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, estaban encaminados a producir pulsos cortos con elevados picos del nivel de potencia. Aparecieron luego otros proyectos: en la Escuela Politécnica de Francia, en la empresa TRW y en el Laboratorio Lawrence Livermore. (Los pulsos cortos son más útiles para muchas aplicaciones que los más largos con la misma potencia media, pues liberan más fotones sobre un blanco antes de que el haz incidente haya cambiado significativamente el estado del blanco.) Los experimentadores utilizaron haces de electrones intensos con



2. ELECTRONES de un LEL típico; adquieren velocidad en un acelerador lineal y se hacen pasar entonces a través de una cavidad donde interaccionan con un campo magnético alternante para amplificar un haz de luz incidente. El campo magnético se produce en un conjunto de imanes opuestos: el vibrador; la longitud de onda de la luz que los electrones amplificarán depende de la velocidad de éstos y de la distancia entre los sucesivos polos del vibrador. La magnitud del movimiento transversal inducido por el vibrador determina con qué rendimiento los electrones amplificarán el haz de luz. (Dibujos realizados por Ian Worpole.)

energías superiores al millón de electronvolt (MeV) y corrientes de más de 1000 ampère. La potencia del pico iba desde dos megawatt, a una longitud de onda de dos milímetros en Columbia, a un gigawatt a ocho milímetros en Livermore. El LEL de Livermore convertía el 35 por ciento de la energía de su haz de electrones en radiación de microondas mediante un vibrador no uniforme.

El primer LEL de luz visible se construyó, por fin, en 1983, en el anillo de almacenamiento de electrones ACO de la Universidad de París en Orsay. Desde entonces se ha instalado otro LEL de luz visible en torno a un anillo de almacenamiento de Novosibirsk, en la Unión Soviética. También se han construido LEL de luz visible en Stanford y en la división aeroespacial de Boeing; éstos recurren a aceleradores lineales de radiofrecuencia (linacs de rf).

El trabajo prosigue en el doble frente de los LEL ópticos y LEL milimétricos. Los investigadores tienen la mirada puesta en la alta potencia, en particular, la promedio, y la longitud de onda más corta. El cumplimiento de estos objetivos exigirá mejoras en el diseño de los aceleradores de electrones, que aporten haces más intensos y uniformes, y en el diseño de vibradores, que posibiliten extraer más energía de los electrones y acoplar dicha energía a las longitudes de onda más cortas de la luz.

El rendimiento que puede alcanzar un simple LEL equipado con un vibrador uniforme tiene un límite. Como mucho, los electrones que atraviesen ese sistema pueden transferir en torno a un 12 por ciento de su energía a una onda luminosa que pase por la cavidad. Después de perder dicha fracción de su energía, los electrones quedan atrapados por la onda ponderomotriz; se frenan hasta el punto en que ya no pueden transferir energía eficazmente a la onda. Para incrementar el rendimiento más allá de este punto, debe encontrarse un modo de frenar la onda ponderomotriz (para que ajuste su velocidad a la de los electrones), o de que los electrones se aceleren, para ir al paso de la onda ponderomotriz.

En general, esto se logra variando la amplitud o el período del vibrador, a fin de mantener la velocidad hacia adelante del haz. Cuando el haz de electrones entra, por primera vez, en el vibrador, se está moviendo esencialmente en línea recta: toda su velocidad está en la dirección axial. El campo magnético del vibrador provoca que el haz se desvíe en la dirección transversal, reduciendo la velocidad hacia delante y convirtiendo parte de ella en velocidad transversal. La velocidad axial es, desde luego, la componente que debe ajustarse a la velocidad de la onda ponderomotriz. La reducción gradual, ya sea de la intensidad del campo del vibrador, o de su período, de un extremo al otro de la cavidad, reduce la velocidad transversal de los electrones y la convierte de nuevo en velocidad axial, manteniendo el avance del haz de electrones incluso cuando el haz cede energía a la onda luminosa que se está amplificando. Los electrones realizan pequeñas excursiones transversales; de ese modo pueden mantener la velocidad axial necesaria para llevar el paso de la onda ponderomotriz, aun cuando su velocidad total disminuya.

En un LEL con un vibrador variable, la captura del haz de electrones en los valles de la onda ponderomotriz no supone, pues, el fin de la transferencia de energía. Conforme vacía el vibrador, los electrones atrapados pueden volver a ganar velocidad axial, cabalgando de nuevo sobre la cresta de la onda ponderomotriz y continuando el proceso de amplificación. En el LEL de onda milimétrica de Livermore, un vibrador variable extrajo el 35 por ciento de la energía de un haz de electrones y lo convirtió en radiación electromagnética, mientras que un vibrador uniforme extrajo, en el mismo sistema, sólo el 6 por ciento. Los cálculos teóricos indican que un vibrador variable podría convertir hasta un 65 por ciento de la energía de un haz de electrones en radiación coherente.

Otra consideración en la elección del diseño del vibrador es la competencia entre un vibrador helicoidal y otro planar. Los vibradores helicoidales dirigen el haz de electrones en una trayectoria espiral, en vez de la sinusoidal impuesta por un vibrador planar. La trayectoria espiral implica que las velocidades transversal y axial del haz permanecen constantes, en vez de oscilar, como lo harían en el movimiento de un lado a otro inducido por un vibrador planar. El vibrador helicoidal induce la misma interacción entre el haz de electrones y la onda ponderomotriz con aproximadamente el 70 por ciento de campo magnético exigido por un vibrador planar. Por otro lado, los vibradores planares, más fáciles de ajustar, simplifican los experimentos con distintos vibradores variables.

Los vibradores avanzados extraen más energía de un haz de electrones, pero el mejor funcionamiento de un LEL exige también un haz de alta calidad. Los físicos experimentales siguen refinando los aceleradores de electrones que suministran los haces necesarios para los láseres de electrones libres; las distintas clases de aceleradores se adecuan mejor a los diferentes tipos de LEL. Así, los anillos de almacenamiento de electrones producen haces de alta calidad y alta energía de corrientes bajas y moderadas; son, pues, los mejores para láseres de baja potencia y corta longitud de onda. Los LEL que usan electrones de alta energía tienen normalmente poca ganancia; débese ello a los electrones: al viajar a velocidades próximas a la de la luz, presentan masas efectivas elevadas y, por tanto, responden a los campos del vibrador. El haz de electrones en un anillo de almacenamiento consta de series de pulsos, cada uno de los cuales tiene una longitud de unos picosegundos; circulan por el anillo continuamente, permitiendo que el LEL funcione como un oscilador. La luz de LEL producida por el haz de electrones proveniente de un anillo de almacenamiento está formada por pulsos cortos que se ajustan a los del haz. Estos pulsos deben moverse muchas veces adelante y atrás de la cavidad para alcanzar su nivel de potencia.

Los aceleradores lineales de radiofrecuencia utilizan una serie de cavidades que contienen campos electromagnéticos rápidamente variables para acelerar los electrones. Producen haces formados por una secuencia de macropulsos (normalmente de un microsegundo de duración); cada uno consta de series de micropulsos de un picosegundo. Estos aceleradores suministran hoy los electrones a los osciladores LEL que producen luz visible. Los LEL alimentados por linacs de radiofrecuencia emiten pulsos muy parecidos a los de los LEL alimentados por anillos de almacenamiento, pero con potencias mucho más elevadas.

Los aceleradores lineales de inducción se hallan capacitados para alimentar LEL de alta potencia; funcionan cambiando rápidamente la intensidad del campo magnético de la cavidad e induciendo, por tanto, una fuerza electromotriz. El haz de electrones se comporta, pues, como la bobina secundaria de un transformador magnético. Los linacs de inducción producen haces con potencias de pico mayores que los linacs de radiofrecuencia, pero hay que someterlos a un encendido reiterado para alcanzar potencias medias altas. Los físicos de Livermore han obtenido pulsos de 50 nanosegundos con corrientes de 10.000 ampère y energías de 50 MeV. Actualmente, están desarrollan-

do linacs que pueden suministrar mil veces por segundo tales paquetes de electrones.

Aunque su potencia media es menor que la de un linac o acelerador lineal, los aceleradores electrostáticos pueden suministrar haces continuos de electrones adecuados para los LEL, mediante la emisión de haces desde la zona de microondas hasta el visible. Algo que está al alcance del microtrón, dispositivo que consiste en una única cavidad aceleradora de radiofrecuencia, acoplada a un imán que provoca que el haz de electrones describa un círculo y pase muchas veces por la cavidad acelerante. Los aceleradores electrostáticos y los microtrones podrían resultar más adecuados para la investigación y las aplicaciones biomédicas, donde importan más la coherencia de la luz del láser de electrones libres y su capacidad de sintonización que una potencia altísima.

Sin haber alcanzado todavía la madurez, los láseres de electrones libres se están aplicando en el ámbito de la investigación como fuentes potentes de radiación visible e infrarroja, tanto continua como pulsante. Se les ve futuro entre el utillaje de disciplinas muy dispares, desde la biomedicina hasta la física del estado sólido. El primer servicio experimental de LEL se estableció en 1984, gracias a Luis R. Elías, de la Universidad de California en Santa Bárbara. Un acelerador electrostático de pulso largo de 3 MeV suministra los electrones. El sistema produce una potencia de pico de 10 kilowatt en longitudes de onda infrarrojas lejanas, desde 390 a 1000 micras. En uno de los primeros experimentos realizados con el dispositivo, los investigadores analizaron el papel de la longitud de onda en las mutaciones inducidas por la luz en moléculas de ADN. El servicio de Santa Barbara se ha utilizado también para estudiar la estructura de las bandas de energía de los electrones en semiconductores, el desdoblamiento Stark de las líneas espectrales en campos eléctricos intensos y las excitaciones de fonones lineales y no lineales en cristales. (Llamamos fonones a las ondas sonoras cuantificadas.)

Más recientemente, Madey ha establecido un servicio de usuarios en Stanford. Este LEL se basa en un linac de radiofrecuencia; su luz es sintonizable desde el visible, a 0,5 micras, hasta el infrarrojo medio de 10 micras. El láser emite trenes de pulsos de varios microsegundos de duración, logrando potencias de pico que alcanzan los dos megawatt. Está programado abrir un tercer servicio de LEL en la Universidad Vanderbilt, a principios de 1990. Según el proyecto, su láser será sintonizable desde 0,2 micras, en el ultravioleta medio, hasta 10 micras.

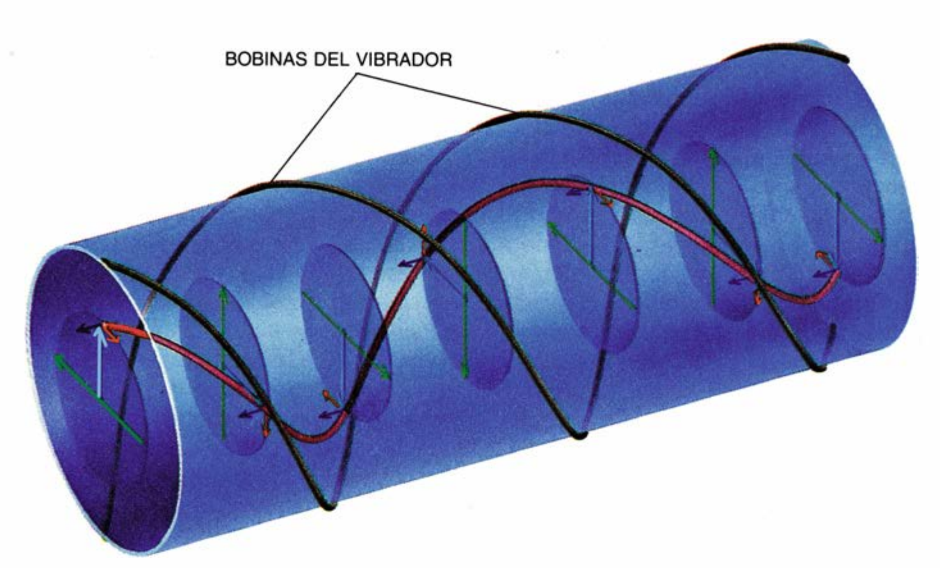
Los láseres de electrones libres encuentran su lugar ideal en las aplicaciones quirúrgicas. Producen cortes y fotocoagulaciones (cauterizaciones). Los cortes exigen, por lo común, luz infrarroja de tres micras, una longitud de onda que las moléculas de agua de los tejidos absorben fuertemente, pero que se dispersa poco. Por otro lado, la coagulación exige longitudes de onda comprendidas entre 1 y 1,5 micras, que el agua absorbe fuertemente, y se dispersan también fuertemente, lo que limita su alcance a una delgada capa de tejido. En principio, un LEL podría sintonizarse, a voluntad, a longitudes de onda cortas o largas en el transcurso de una operación quirúrgica.

La elevada potencia del sistema de Stanford le confiere especial idoneidad para el estudio de aplicaciones quirúrgicas. El láser calienta muy rápidamente el tejido blando y los huesos a la vez, creando un plasma sobrecalentado. (El mecanismo de corte típico de los láseres quirúrgicos es la ablación térmica.) La combinación de la alta potencia y de los pulsos cortos da lugar a cicatrices menores y a curaciones más rápidas, en comparación con los efectos de los láseres quirúrgicos actualmente en uso.

Pero en su mismo alto nivel de potencia de los pulsos llevan los LEL su máximo inconveniente. Idóneas para el buen quehacer quirúrgico, tales ráfagas de fotones pueden resultar excesivas y de manejo imposible por parte de las fibras ópticas existentes. Habría que esperar nuevas fibras capaces de resistir potencias más elevadas. Menos domeñable es la cuestión relativa al tamaño y complejidad de un sistema LEL. Los haces de electrones de alta energía, necesarios para producir radiación de corta longitud de onda, producen también flujos notables de rayos X y de neutrones. Sumados, la fuente de alimentación, el acelerador, el vibrador, la óptica y el apantallamiento constituyen un conjunto voluminoso. Los LEL podrían, pues, quedar confinados en centros de investigaciones médicas o limitados a servicios muy especializados.

Las dificultades de los láseres de electrones libres presentan menos contratiempos a los físicos de estado sólido. Pueden éstos usar haces intensos de luz monocromática para estimular estados excitados en sólidos cristalinos o amorfos. La sintonía permite a los físicos experimentales ajustar la energía del fotón a muchas transiciones distintas. Los LEL alimentados por aceleradores lineales de radiofrecuencia, los microtrones y los anillos de almacenamiento encajan a la perfección en estos experimentos; en efecto, producen pulsos de luz de unos picosegundos, que son ideales para excitar los electrones y seguir la subsiguiente desexcitación de sus estados energéticos.

La alta potencia, la coherencia y la instantánea brevedad de sus pulsos dotan, a los láseres de electrones libres, de especial virtud para los experimentos en áreas que analizan procesos físicos dinámicos: la química de la combustión, la espectroscopía de fluorescencia de alta resolución y la ionización multifotónica de líquidos, por citar sólo



3. UN VIBRADOR HELICOIDAL dirige un haz de electrones, según una trayectoria espiral, a través del LEL. Las velocidades transversal y frontal de los electrones son constantes. El campo magnético de una onda luminosa polarizada circularmente que atraviesa la cavidad del LEL (*flechas de color*) con el haz de electrones, acoplado a la velocidad transversal de dicho haz (*flecha roja*), produce una fuerza perpendicular a ambos (*flecha púrpura*). Esta fuerza axial frena los electrones y suministra, a su vez, energía a la onda luminosa.

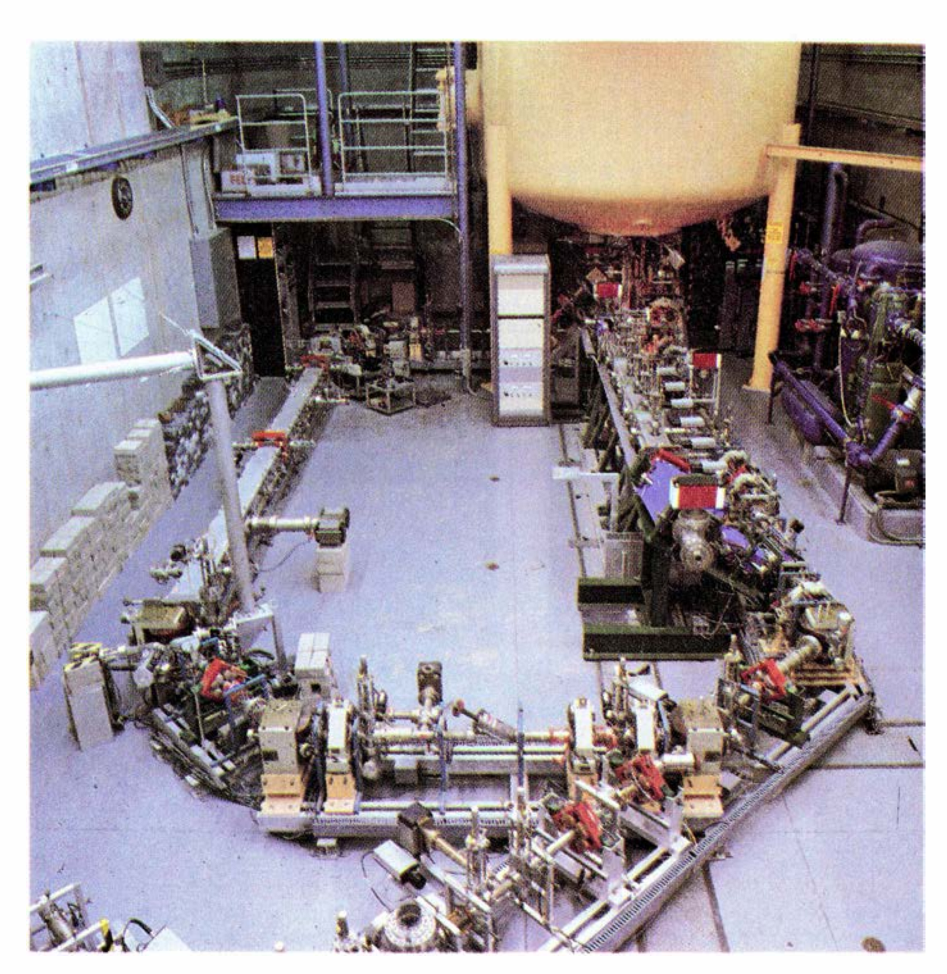
algunas. La intensidad de las fuentes luminosas de los LEL les da ventaja sobre las fuentes de luz de sincrotrón, que son sintonizables, pero incoherentes.

Además de sus aplicaciones en la investigación, los láseres de electrones libres ofrecen también aplicaciones en las comunicaciones, el radar y el calentamiento de plasmas. Los LEL pueden constituir una fuente de radiación milimétrica y micrométrica de alta potencia para radares de largo alcance y alta resolución. Se está estudiando su posible aplicación al calentamiento de plasmas confinados magnéticamente para producir la fusión termonuclear controlada. Aunque en un comienzo se creyó que los plasmas confinados en una botella magnética toroidal, o tokamak, alcanzarían las densidades y temperaturas exigidas para la ignición mediante el calentamiento óhmico —resultado de una corriente inducida en el plasma por una bobina externa—, sabemos hoy que se necesitará un calentamiento adicional. Se ha propuesto la absorción resonante de radiación de longitud de onda milimétrica; un láser de electrones libres es una posible fuente.

El gran proyecto en tokamak, acometido en los Estados Unidos y que lleva por nombre "toro de ignición compactada" ("compact ignition torus") empezará a funcionar en 1996. Exigirá radiación de longitud de onda de un milímetro o menos, con una potencia media de unos 20 megawatt durante un pulso de unos tres segundos. Ninguna fuente de radiación existente puede cumplir esta exigencia, pero los LEL han funcionado en esta región espectral, con tales niveles de potencia, durante pulsos más cortos. Quizá podría aumentarse la duración de los pulsos de los LEL para satisfacer las necesidades de un experimento de fusión.

Más controvertida es la aplicación de los láseres de electrones libres de alta potencia y pulso largo al programa de defensa estratégica, caza de misiles balísticos incluidos. Los planificadores de la IDS imaginan un láser enorme, instalado en tierra, que enfocaría su luz hacia un blanco mediante espejos terrestres y orbitales. Se está trabajando en modelos que se fundan en LEL amplificadores y en LEL osciladores.

En experimentos realizados en el último año, un LEL de Livermore amplificó una señal de entrada de 14 kilowatt de un láser de dióxido de carbono de 10,6 micras hasta un nivel de unos siete megawatt, una ganancia de un factor 500. El aumento del haz de entrada



4. SERVICIOS DE LEL. Aquí, el que ofrece la Universidad de California en Santa Barbara. Se halla a disposición de los investigadores que necesiten láseres de electrones libres. Los primeros experimentos exploraron la influencia de la longitud de onda sobre las mutaciones del ADN inducidas por la luz.

hasta cinco megawatt dio una potencia de saturación de 50 megawatt. En los experimentos iniciales, los investigadores utilizaron un vibrador planar de 15 metros con un período y amplitud uniformes; desde entonces, han alargado el vibrador hasta 25 metros, y se está trabajando en una versión mejorada para aumentar aún más el rendimiento de extracción.

La empresa Boeing ha construido un LEL oscilador experimental, formado por un vibrador planar de cinco metros de largo y un linac de radiofrecuencia avanzado. El haz del linac logra energías de hasta 120 MeV. El oscilador ha producido luz láser en la zona roja del espectro visible, a 0,62 micras; los niveles de potencia superaron, en mil millones de veces, los de la emisión espontánea normal de la cavidad. La potencia media durante el transcurso de un pulso de 100 microsegundos es de unos dos kilowatt. El rendimiento correspondiente de conversión se cifra en torno al 1 por ciento, pero la potencia de pico supone la cantidad, más respetable, de 40 megawatt. Aunque los osciladores suelen generar armónicos de corta longitud de onda que pueden dañar los espejos de la cavidad, no se ha observado hasta ahora ninguna degradación. Como en los experimentos de Livermore, se está trabajando para modificar el vibrador uniforme en una nueva configuración que aumente el rendimiento del oscilador.

Para destruir un misil durante su fase de aceleración, se necesitan —de acuerdo con cifras sobre las que no pesa secreto oficial— pulsos de luz visible o del infrarrojo próximo de un segundo, capaces de liberar entre 10 y 100 megajoule. Ello implica alargar los pulsos o incrementar los niveles de potencia de pico de los LEL existentes en un factor de un millón o más. A tenor del rendimiento del láser y de la dureza del blanco, un conjunto de láseres de electrones libres en tierra exigiría de 400 megawatt a 20 gigawatt de potencia a lo largo de varios minutos durante un ataque. (Por mor de comparación, una central eléctrica grande genera unos 1000 megawatt.) Por este y otros motivos, no se ve clara la viabilidad de aumentar los láseres de electrones libres hasta los niveles de potencia exigidos. La cuestión se despejará con los experimentos en marcha y los futuros.

En este ámbito de aplicación, como

en otros muchos, los láseres de electrones libres tienen mucho camino por recorrer antes de alcanzar la madurez técnica. Conocemos ya los principios fundamentales en que se basan los láseres de electrones libres. La investigación se ha orientado hacia el desarrollo de mejoras en las fuentes de haces de electrones y en el diseño de vibradores. Importa reconocer que, hasta la fecha, buena parte del trabajo se ha realizado con aceleradores cuyo destino original nada tenía que ver con la alimentación de láseres de electrones libres. Cuestiones como la calidad del haz, cruciales para el funcionamiento de los LEL, no se habían planteado en los debidos términos. De momento, los únicos aceleradores diseñados para los LEL son el linac de radiofrecuencia de Boeing, un linac de inducción de Livermore y el acelerador electrostático de Santa Barbara.

Con la creación específica de aceleradores destinados a la alimentación de láseres de electrones libres, sus propiedades de operación influirán en otras partes del sistema, en los vibradores por ejemplo. Además de avanzar en su refinamiento, los vibradores del futuro se diseñarán insistiendo en el desarrollo de vibradores de período corto. Tales dispositivos podrían generar luz de longitud de onda corta con haces de electrones de escasa potencia. Sin la exigencia de voltajes altos, se allanaría el diseño de aceleradores y disminuirían la necesidad de apantallar los rayos X producidos por el haz. Lo cual, a su vez, reduciría el tamaño y la complejidad de los LEL, abriendo las puertas a una extensa aplicación de su luz intensa y sintonizable.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EXPERIMENT ON RADIATION BY FAST ELECTRON BEAMS. H. Motz, W. Thon y R. N. Whitehurst en *Journal of Applied Physics*, vol. 24, n.º 7, págs. 826-833; julio de 1953.

FIRST OPERATION OF A FREE-ELECTRON LASER. D. A. G. Deacon, L. R. Elias, J. M. J. Madey, G. J. Ramian, H. A. Schwettman y T. I. Smith en *Physical Review Letters*, vol. 38, n.º 16, págs. 892-894; 18 de abril de 1977.

NEW SOURCES OF HIGH-POWER COHERENT RADIATION. Phillip Sprangle y Timothy Coffey en *Physics Today*, vol. 37, n.º 3, págs. 44-51; marzo de 1984.

FREE-ELECTRON LASERS. Thomas C. Marshall. Macmillan Publishing Co., 1985.

HISTORY OF THE UBITRON. R. M. Phillips en *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, vol. A272, n.º 1, págs. 1-9; septiembre de 1988.

Función sensorial en la foca común

De hábitos anfibios, la foca común divide su tiempo entre la tierra y el agua. En el océano, debe navegar, localizar sus presas y seguir el rastro de su cachorro; en tierra pare, alimenta a su cría y descansa

Deane Renouf

Por la noche las focas navegan en busca de peces por aguas sombrías; durante el día, se las ve arrastrándose por la tierra, donde se tienden al sol y, una vez al año, paren a sus crías. Dividir de este modo el tiempo entre mar y tierra tiene su precio: las focas, como otros pinnípedos (el orden al que pertenecen las focas, los leones marinos y las morsas), han tenido que adaptarse a dos tipos de retos físicos. El sonido y la luz se comportan de forma distinta en el aire y en el agua, y los órganos sensoriales que se hallan adaptados a un medio tienden a funcionar de forma diferente en el otro. Considérese el ojo de la foca. ¿Cómo es que, estando diseñado para funcionar en el agua, cumple también su misión en tierra? ¿En qué tipos de receptores sensoriales especiales fía la foca para encontrar su camino a través de aguas turbias y picadas?

Durante los últimos diecinueve años he venido estudiando la función sensorial en la foca común, *Phoca vitulina*. Esta especie es un buen modelo para abordar la adaptación de los pinnípedos a una existencia anfibia. (Para mí, además ofrece la ventaja adicional de que se encuentra en aguas costeras inmediatas al lugar donde vivo, en Terranova.) Después de muchos años de observar a este animal, tanto en su hábitat natural como en cautividad, continúo intrigada por algunas de sus capacidades sensoriales.

Aunque se trata de una especie común a lo largo de las costas septentrionales de los océanos Atlántico y Pacífico, *P. vitulina* es extraordinariamente difícil de estudiar en condiciones naturales. Es un animal muy asustadizo y huye océano adentro a la menor provocación. Este comportamiento explica la imposibilidad de estudios cuantitativos, lo cual acabó por desanimar a muchos investigadores. A mí me ha acompañado la suerte: he encontrado un lugar en la isla de Miquelon (a unos 18 kilómetros mar adentro del extremo sudoriental de Terranova) que es ideal para observar colonias de focas a poca distancia.

Durante la estación reproductora –a finales de primavera y principios de verano– y en marea baja, unas 800 focas (machos y hembras) se agrupan en bajíos arenosos que quedan al descubierto cerca del centro de Grand Barachois, una laguna. Las hembras paren por esta época y permanecen con sus cachorros hasta que éstos son destetados a la edad aproximada de cuatro semanas. Las actividades diarias de la foca están sincronizadas con la marea: cuando ésta es alta, las focas (incluyendo madres y cachorros) se ven forzadas a abandonar los bajíos de arena y a introducirse en el agua, donde permanecen hasta que la marea retrocede y los bajíos se hallan expuestos nuevamente. Mis colegas y yo hemos construido puestos de observación elevados adyacentes a los bajíos arenosos, desde los que podemos observar a las focas de cerca sin molestarlas. Descubrimos que si entrábamos en los puestos de observación durante la marea alta, los animales no nos prestaban la menor atención cuando volvían en marea baja. Desde este lugar estratégico hemos observado la adaptación de las focas a retos ambientales decisivos.

John W. Lawson, alumno mío de los cursos de doctorado, comprobó el parto controlado en la foca común, una adaptación fisiológica que permite a las hembras acelerar o retardar el nacimiento de un cachorro en función de las condiciones ambientales. En tres ocasiones, cuando una hembra en los estadios finales del parto fue perturbada por la llegada de un grupo de turistas, Lawson vio cómo la cabeza del cachorro que estaba saliendo desaparecía de nuevo en el canal del parto y el parto se detenía, para reanudarse sólo cuando cesaba la perturbación. Sospechamos que la capacidad de una foca para controlar el momento exacto del nacimiento de su cachorro es una adaptación que limita al máximo el riesgo de depredación y permite a las focas sincronizar su parto con el inicio de la marea baja.

Mientras estudiábamos la colonia de cría desde nuestros puestos de observación me interesé por la relación íntima que existe entre las hembras y sus cachorros. Los hábitos anfibios y el comportamiento asustadizo de la foca determinan que los lazos entre madres e hijos encierren cierto carácter problemático. He visto a un cachorro que contaba menos de 15 minutos de vida seguir a su madre hacia el océano, donde la visibilidad suele ser baja, la corriente fuerte y el nivel de ruido ambiental (causado por el viento, el agua picada y la turbulencia) alto. Si una madre y su cachorro se ven separados, la probabilidad de reunirse es débil; esta predicción se ve subrayada por el número de cachorros destetados que mueren de inanición cada año, cuando se encuentran separados de sus madres, que en algunas colonias llega al 10 por ciento.

Si las focas se precipitan en el océano a la menor perturbación, ¿cómo se las arregla un cachorro recién nacido para permanecer junto a su madre? Parece

DEANE RENOUF es profesora de biopsicología en la Universidad de Terranova, que la contrató en 1975. Aunque allí inició su formación, se doctoró en psicología por la de Dalhousie, en Nueva Escocia. Casada y madre de cuatro hijos, dedica el tiempo que le dejan a las focas y a sus clases de etología.

que hay varios factores responsables de ello. El cachorro de foca común muestra una respuesta de seguimiento (algo parecido a la impronta en las aves) a los pocos minutos de vida, y seguirá a su madre dondequiera que ésta vaya. La relación es recíproca: la madre, a su vez, vigila el paradero de su cachorro. Las hembras siguen a sus cachorros visualmente (en el agua se las puede distinguir girando su cabeza hacia atrás para dirigirles una mirada de control, de arriba abajo) y también acústicamente: un cachorro de foca común vocaliza casi continuamente cuando sigue a su madre, emitiendo una llamada que se transmite, a la vez, en el aire y bajo el agua; la llamada desaparece de su repertorio de emisión de sonidos poco después del destete.

Para comprobar si una madre distinguía a un cachorro por su llamada, con mi alumna de doctorado Elizabeth Perry registramos las llamadas de cachorros recién nacidos y las analizamos sonográficamente. Encontramos que la llamada de cada cría presentaba una pauta de frecuencia única. ¿Distinguía esas diferencias la madre?

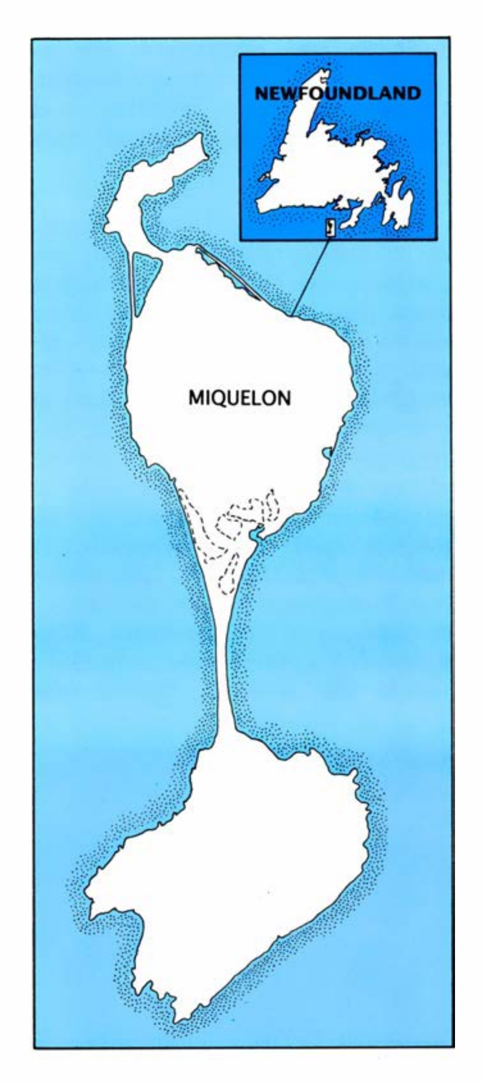
Para responder a la pregunta diseñamos un experimento que nos permitiera someter a prueba la capacidad de la hembra de distinguir entre llamadas diferentes. En el centro de ciencias oceánicas adscrito a nuestra universidad adiestramos a una foca cautiva: debía abrir la puerta de un comedero específico cuando oía una llamada, y la puerta de otro cuando oía una llamada distinta. Cada vez que acertaba con la asociación correcta, la premiábamos con arenques. Le presentamos seis llamadas diferentes en combinaciones dispares; tras un breve período de adiestramiento, logró distinguir entre las llamadas por lo menos en un 80 por ciento de las veces. Ese resultado nos mueve a creer que las hembras reconocen a sus cachorros en el océano mediante sus emisiones vocales.

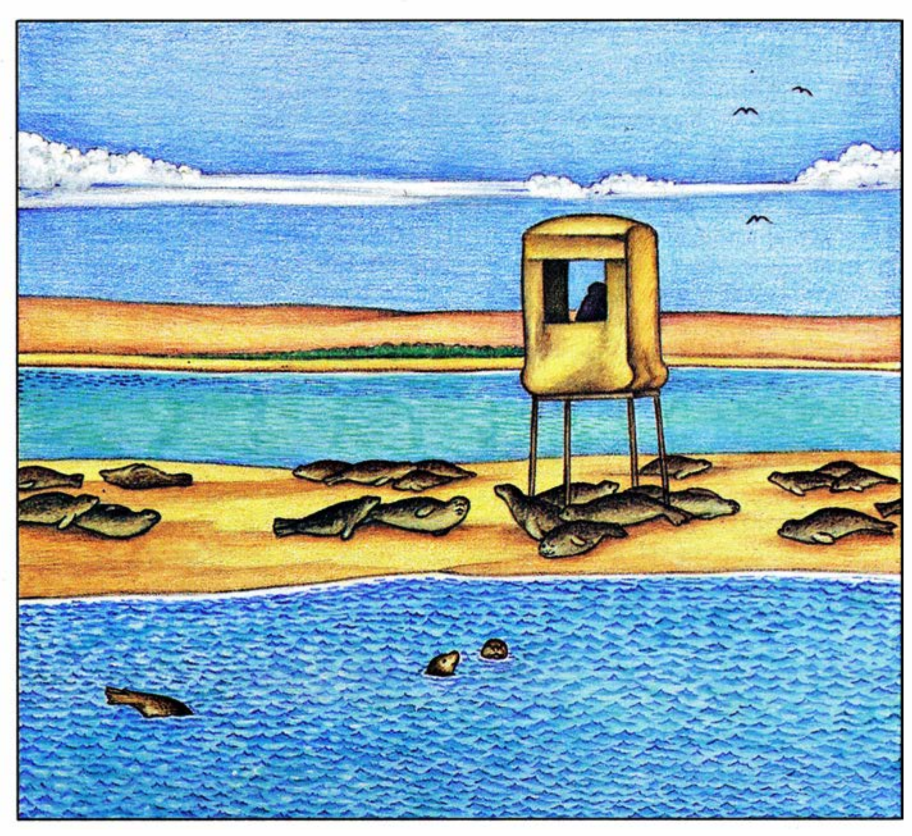
La vocalización constituye, sin duda, un método importante para que una madre y un cachorro permanezcan juntos, pero la foca común vive en un ambiente dominado por niveles de ruido de volumen elevado. ¿Cómo se las arregla una madre para oír la llamada de su cachorro cuando el ruido de fondo (sobre el agua) alcanza los 80 decibelios o más (un nivel comparable al generado en un medio urbano por un tráfico intenso)? Cuando los niveles de ruido ambiental son altos, ¿pueden las focas detectar sonidos que, para los seres humanos y otros animales, están enmascarados por el ruido de fondo?

Inicié una serie de experimentos



1. FOCA COMUN, *Phoca vitulina*, fotografiada en las costas de Terranova. Tiene bigotes bien desarrollados, llamados vibrisas, y ojos adaptados a la visión subacuática. Esta especie, que habita a lo largo de las costas septentrionales del Atlántico y Pacífico, muestra un comportamiento asustadizo y receloso.





2. GRAN COLONIA DE CRIA de focas comunes; puede encontrarse cada primavera y verano en la isla de Miquelon, a unos 18 kilómetros mar adentro de la costa meridional de Terranova. Las focas se arrastran hasta los bajíos arenosos (*señalados en el mapa mediante líneas de trazos*) que quedan al descubierto durante la marea baja. En pleamar, cuando los bajíos aparecen cubiertos por las aguas, las focas se retiran al océano. Si la autora y sus colegas entran en el puesto de observación cuando la marea está alta (*arriba*), serán tolerados cuando las focas vuelvan en bajamar, estratagema que le permite observar focas a corta distancia.

para determinar hasta qué punto el ruido afectaba al umbral auditivo de la foca común. Adiestré a dos animales; debían nadar hasta un canalete en un extremo del tanque, cuando oían un tono (una corta emisión de unos 25 decibelios, que se presentaba simultáneamente con ruido blanco de 60, 70 u 80 decibelios), y pasar hasta otro canalete en el extremo antagónico si no oían el tono. Descubrí que el umbral auditivo de una foca común ascendía con niveles de ruido de fondo altos, y la foca, igual que otros mamíferos, carecía de capacidad para compensar el ruido. Extrapolando a partir de estos hallazgos, calculé que un cachorro podía ser oído sólo si permanecía a una distancia de no más de unos ocho metros de su madre.

Sin embargo, dentro de este radio de ocho metros, las hembras son maestras en la localización de su cría. Creo que esta capacidad puede atribuirse a una disposición auditiva cuadrafónica única que les permite determinar desde qué dirección procede un sonido. En tierra, el sonido alcanza el oído interno de la foca (como ocurre con la mayoría de los demás mamíferos) a través del meato o canal auditivo; su dirección se determina por la diferencia en el tiempo de llegada a cada oído. (Además, ciertas características sonoras, como volumen y tren de ondas, vienen condicionadas por el tiempo de llegada.) En el agua, donde el sonido viaja unas cuatro veces más deprisa que en el aire, cuesta más detectar la diferencia en el tiempo de llegada.

Bertel Möhl, del Instituto de Zoología de Aarhus, ha demostrado que, en el agua, el sonido alcanza el oído interno de la foca a través de una banda vertical de tejido especial, que se extiende desde la abertura auditiva hacia abajo. Cuando la cabeza de la madre se halla parcialmente sumergida, es posible que el sonido pase a través del meato auditivo y, a la vez, de la banda de tejido auditivo, lo que le permitiría oír tanto la versión aérea como la subacuática de la llamada de su cachorro. Puesto que la llamada llega a estos receptores en momentos ligeramente diferentes, la foca podría, en este caso, discernir la dirección de donde procede y hacerlo con más precisión que si fiara solamente en las versiones aérea o subacuática de ese reclamo.

La foca común está dotada de un sistema visual que reviste especial interés. Refleja sus hábitos anfibios. Los estudios etológicos realizados por Ronald J. Schusterman y sus colegas, de la Universidad de California en Santa Cruz, y los anatómicos de Glen Jamieson, de la Universidad de la Columbia Británica, entre otros, demuestran que el ojo de la foca se halla cabalmente adaptado para ver bajo el agua y en tierra. El cristalino, grande y esférico, posee la forma adecuada para conseguir agudeza bajo el agua. El tamaño y la forma del ojo compensan el hecho de que el índice de refracción del agua es casi el mismo que el de la córnea. En consecuencia, las ondas luminosas que penetran en el ojo de una foca en el agua no se refractan, o curvan, cuando pasan a través de la córnea, como ocurre en el aire. En cambio, son refractadas sólo por el cristalino, que las conduce a la retina, o plano de focalización, en la parte posterior del ojo.

Por su parte, los seres humanos, cuyos ojos funcionan mejor en tierra, con una córnea refractante, ven mal bajo el agua. Sin la ayuda de la córnea, la luz es refractada por el cristalino, de modo que la imagen visual ya no se forma en la retina y, por tanto, se ve bo-

rrosa. En las focas la imagen visual se forma en la retina y está enfocada.

En el aire, la córnea de la foca es astigmática: su curvatura está distorsionada, en particular a lo largo del plano horizontal del ojo; las ondas luminosas quedan afectadas por la distorsión al atravesar el ojo. En el agua, dicho astigmatismo carece de relevancia, porque la luz allí no se refracta al pasar a través de la córnea. En tierra, la foca compensa este astigmatismo con una pupila estenopaica (que se contrae verticalmente). La pupila se cierra hasta formar una estrecha rendija vertical, paralela al eje de menor astigmatismo; en razón de ello, la zona más astigmática de la córnea no interviene, o acaso muy poco, sobre la visión de la foca. En playas brumosas o poco iluminadas, la pupila no se contrae y la foca tiene una visión borrosa. Pero cuando los niveles de luz son mayores, como suele ocurrir cerca del océano o sobre el hielo, la pupila compensa el astigmatismo y la agudeza visual de la foca en el aire es, en teoría, comparable con la que el animal tiene en el agua.

Bajo el agua, las focas comunes se caracterizan por su finísima sensibilidad en niveles de luz bajos; Douglas Wartzok, de la Universidad de Purdue, ha demostrado, por ejemplo, que en una noche iluminada por la luna y en agua clara la foca detecta un objeto móvil a profundidades de hasta 466 m.

¿Cómo se las ingenia el animal, que pasa gran parte de su tiempo en aguas sombrías con una visibilidad casi nula y come sobre todo por la noche, para encontrar los tres kg o más de peces que debe cazar cada día? En la década de 1960, Thomas C. Poulter, del Instituto de Investigación de Stanford, y otros sugirieron que los leones marinos de California (*Zalophus californianus*) descubrían e identificaban la presa mediante ecolocación. El fenómeno de la ecolocación, hallado primero en los murciélagos y descrito luego en aves, marsopas y delfines, es similar por su principio al radar. Los animales que localizan por el eco emiten una serie de pulsos sonoros de alta frecuencia que se reflejan en todo cuanto inciden; a su vez, los reflejos son procesados por el cerebro del animal, donde forman una imagen que permite al animal "ver" en la oscuridad.

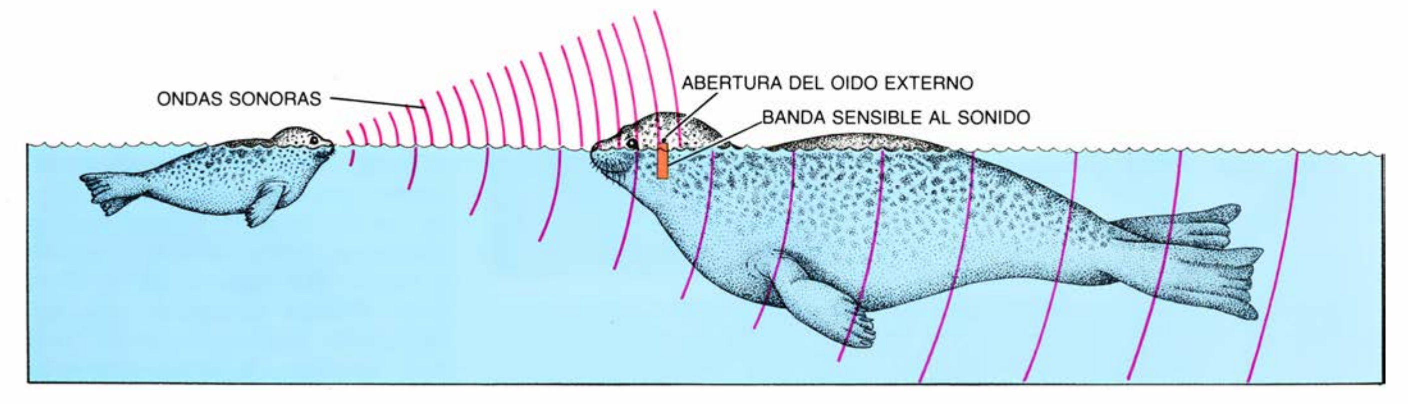
Aunque nadie ha demostrado de manera concluyente que los leones marinos u otros pinnípedos emitan tales pulsos, un número creciente de pruebas circunstanciales abonan la idea según la cual la foca común poseería ese don. Las focas comunes emiten vocalizaciones que suenan como golpes secos; se trata de sonidos de amplia frecuencia, producidos en secuencias cortas, muy rápidas y, con mayor frecuencia, de noche. Registros que he hecho de tales vocalizaciones con un equipo audio especial revelan que muchos de los "clics" caen en la gama de los ultrasonidos (es decir, por encima del límite superior de la audición humana de 20 kilohertz). Trabajando con focas cautivas me he encontrado con que los golpes secos aumentaban al darles de comer por la noche.

En 1968, Möhl demostraba que las focas comunes detectaban frecuencias sonoras muy elevadas, de hasta 180 kHz, y eran muy sensibles a frecuencias de 32 kHz. (Los seres humanos, en cambio, tienen un rango de sensibilidad que va de los 0,02 a los 20 kHz.) Despertaba un obvio interés observar que algunos de los "clics" presentaban un máximo en el rango de los 40 kHz, cerca del pico máximo de sensibilidad de la foca, cifrado en los 32 kHz. En tierra, donde la ecolocación les serviría de poco –se alimenta sólo en el agua–, se muestra incapaz de detectar frecuencias sonoras muy superiores a 16 kHz y no emite "clics"; en cambio, aumenta su vocabulario con gruñidos y bufidos de baja frecuencia.

Con mi alumno Benjamin Davis, diseñé un experimento para comprobar la ecolocación en nuestras focas cautivas. Queríamos saber si podían distinguir entre dos anillas en forma de rosquilla con el mismo aspecto y peso; una anilla estaba llena de agua y la otra de aire (y pequeñas pesas), pero diferían en sus características de reflexión de sonido. Puesto que la densidad de un objeto afecta al modo en que las ondas sonoras se reflejan en él, supusimos que la única manera por la que las focas distinguían las anillas era mediante ecolocación.

Empezamos el experimento enseñándo a la foca a recobrar sólo una de las dos anillas durante la noche: uno de nosotros introducía la anilla en el agua, mientras el otro distraía a la foca en el extremo opuesto del tanque. Se le pedía luego que trajera la anilla; no tardó en aprender; volvía con ella sobre su hocico en unos 34 segundos por término medio, y en premio recibía un pedazo de arenque. Una vez hubimos determinado que la foca podía detectar una anilla escondida y recobrarla sin dificultad, sometimos a prueba la capacidad del animal para distinguir entre las dos anillas. Se siguió el mismo protocolo experimental, con una salvedad: cuando la foca volvía con la anilla llena de aire se la premiaba con un pedazo de arenque, si traía la anilla llena de agua se la sometía a una espera de un minuto, lo que suponía un castigo para una foca hambrienta.

A las 26 sesiones, la foca identificaba correctamente la anilla llena de aire del 75 al 80 por ciento de las veces, una muestra razonable de que podía distinguir entre los dos objetos. Extrajimos



3. LAS FOCAS HEMBRA poseen quizás una disposición auditiva cuadrafónica especial que les permite localizar a sus cachorros en el océano. Cuando un cachorro grita, las ondas sonoras penetran simultáneamente en el aire y en el agua. La autora cree que una madre puede tomar la diferencia en el tiempo de llegada, en la fase y en la intensidad de los dos conjuntos de ondas sonoras para inferir la dirección de la llamada de su cachorro. La foca distingue un conjunto del otro debido a que las ondas sonoras subacuáticas, que se desplazan cuatro veces más rápidas por el agua que por el aire, alcanzan el oído interno a través de una banda vertical del tejido sensible al sonido (*color*), mientras que las ondas aéreas alcanzan el oído interno a través de la abertura externa del canal auditivo.

entonces los pesos y añadimos agua a la anilla llena de aire, con lo que se igualaba en todos los aspectos a la otra anilla. Cuando se repitió el experimento, se mostró incapaz de discernir entre las anillas. Nuestros resultados sugerían que la foca podía ecolocar. Pero había un punto de nuestro estudio que nos dejaba perplejos. Las grabaciones mostraban que la foca vocalizaba muy poco durante su búsqueda de la anilla llena de agua; además, emitía unos "clics" intermitentes y débiles. Ahí estamos, sin poder determinar todavía si la foca común conoce la ecolocación.

¿Habrá algo más que explique la extraordinaria habilidad de la foca común en la navegación y captura de sus presas en su sombrío hábitat oceánico? Durante algunos años pensé en las vibrisas; esos bigotes tenían que ser receptores sensoriales importantes. Las vibrisas, que encontramos en la inmensa mayoría de los mamíferos (si exceptuamos el hombre y contadas especies más), han adquirido un desarrollo particular en focas, leones marinos y morsas. Investigaciones que he realizado con Fred Mills, alumno mío, sugieren que las vibrisas serían muy sensibles al movimiento e intervendrían en la captura de alimento.

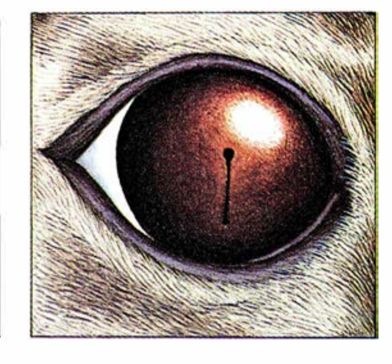
Eran cuatro focas. Debían tocar una varilla vibrante con sus vibrisas, mientras variábamos la frecuencia y la amplitud de las vibraciones. Controlando la respuesta de los animales (les dábamos comida cuando respondían a determinadas vibraciones), descubrimos que su sensibilidad subía con las frecuencias más altas (unos 2,5 kHz). Hallazgo éste un tanto inesperado, por cuanto se aleja de lo que ocurre en otros animales, cuyos sistemas táctiles manifiestan la máxima sensibilidad a frecuencias más bajas. Calculamos que, a una distancia de 43 centímetros, la onda creada por el movimiento caudal de un pez del tamaño de un arenque se atenuaría hasta el umbral inferior de una foca, lo que permitiría, en teoría, que el pinnípedo buscara el pez para capturarlo.

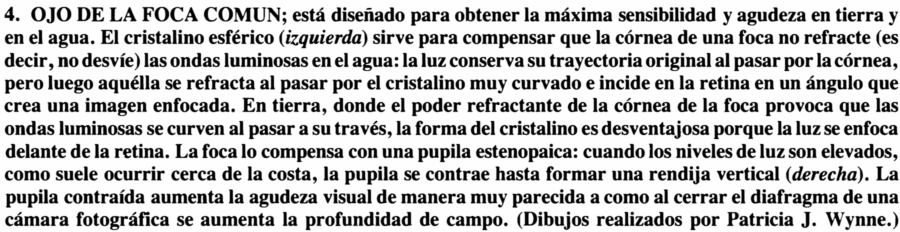
Estas predicciones recibieron una confirmación parcial cuando cortamos las vibrisas de las focas (les vuelven a crecer en unas pocas semanas). En una serie de experimentos de antes-y-después, comparamos la velocidad de pesca cuando las vibrisas estaban intactas con la velocidad a la que lo hacían con las vibrisas recortadas. La eliminación de las vibrisas no ejerció ningún efecto significativo sobre el tiempo que las focas necesitaron para capturar un pez en aguas claras. Repetimos el experimento en aguas sombrías y, aunque siguieron sin mostrar diferencias en el tiempo de localización de las presas con o sin vibrisas, algunas focas desprovistas de bigotes tardaron más tiempo en capturar los peces con la boca.

¿Para qué otra finalidad pueden servir las vibrisas? En 1967, William Montagna, de la Universidad de Ciencias de la Salud de Oregón en Portland, les asignó una presumible función medidora de velocidad: su inclinación correspondería a la velocidad de natación de la foca. Mi colega Linda Gaborko y yo misma nos propusimos comprobar tal hipótesis. Empezamos por adiestrar, a una foca, a nadar a seis kilómetros por hora; debía hacerlo a través de aros situados a lo largo de un recorrido de 17 metros. Por cada circuito en el que mantenía una velocidad constante de seis kilómetros por hora, la premiábamos con arenques. Cuando corría demasiado o nadaba con lentitud excesiva, sonaba un timbre y no se le daba recompensa alguna. Una vez nos hubimos convencido de que la foca podía mantener una velocidad constante (incluso después de un período de descanso de 17 días sin adiestramiento), le cortamos las vibrisas y repetimos la prueba. Su velocidad de natación no se inmutó. A nuestro parecer, pues, las vibrisas son receptores sensoriales importantes, pero no se puede afirmar todavía cuál sea su función precisa.

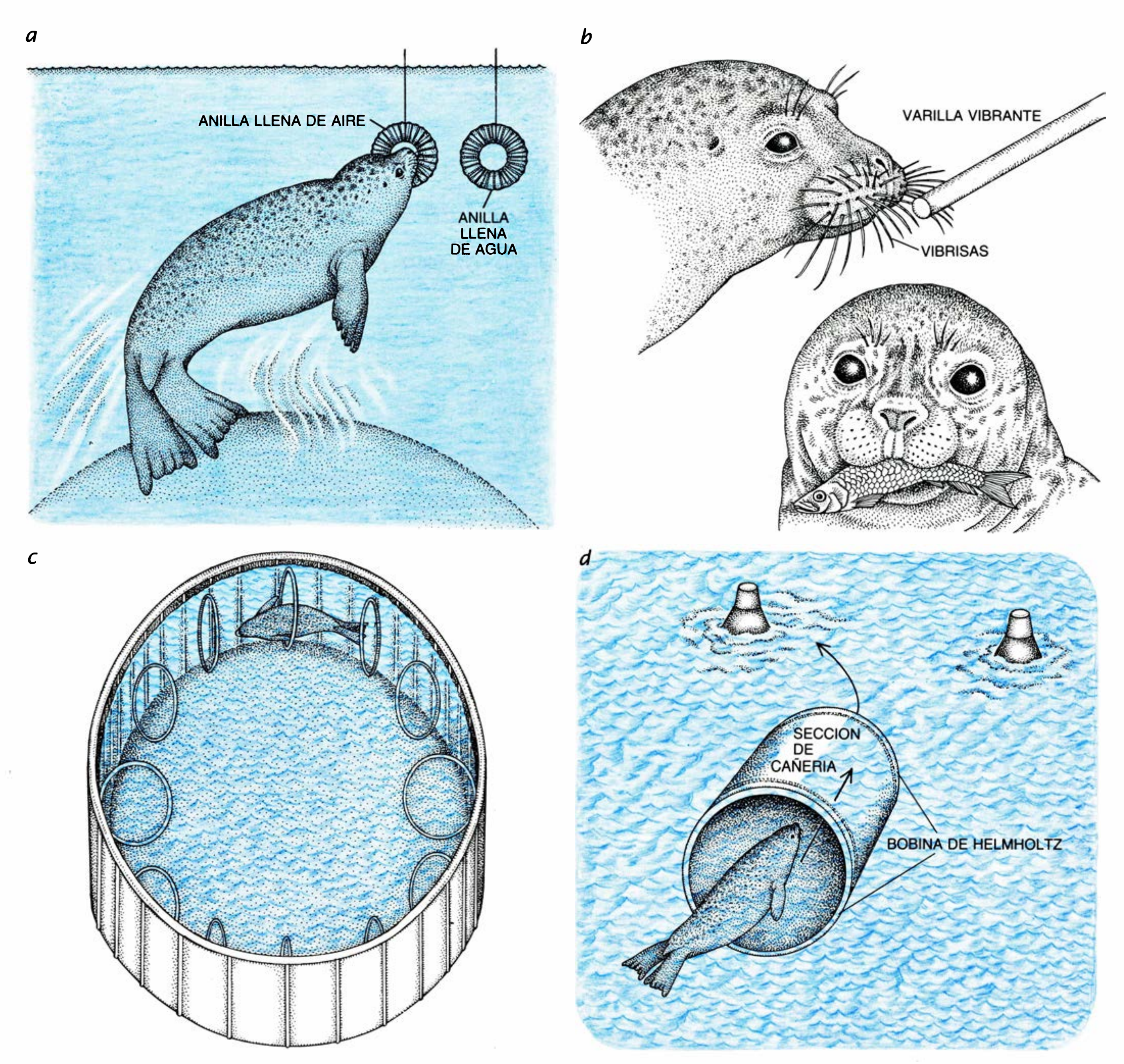
Puesto que en muchos casos las focas parecen proceder sin los canales sensoriales acostumbrados, se me ocurrió que podían ser sensibles a campos magnéticos. Suele aceptarse que las aves detectan el campo magnético de la Tierra y se sirven del mismo para orientarse; ¿por qué les iba a estar vedado a las focas? Para comprobarlo, adiestramos algunos ejemplares cautivos: debían nadar a través de una sección de tubería de fibra de vidrio y de doble pared; en ella habíamos colocado una bobina de Helmholtz: dos aros con alambre de cobre arrollado, a través del cual pasaba corriente eléctrica. Transmitiendo por la bobina una corriente de 2,1 ampère a 70 volt, desplazamos el campo magnético terrestre, en el interior de la sección de tubería, 60 grados en dirección este. Los registros de un magnetómetro nos señalaron que el campo se había desplazado uniformemente en el interior de la bobina y que no se hallaba afectado en su exterior, en una distancia de más de 30 centímetros. Se fijaron dos boyas a un flotador situado a tres metros de la bobina, una a la izquierda y la otra a la derecha de la bobina. Las focas habían de nadar a través de la tubería cuando se les ordenara, tocar la boya izquierda al emerger de ésta cuando el campo magnético de su interior estuviera desviado hacia la derecha y tocar la boya derecha cuando la bobina no estuviera conectada; eso esperábamos que hicieran tras el oportuno adiestramiento.

Las paredes internas de la tubería estaban llenas de aceite de pescado (que evitaba que el agua penetrara en el interior y al mismo tiempo proporcionaba lastre). Una vez preparado el dispositivo, realizamos una serie de sesiones con tres focas. La primera de ellas (un macho) nadó a través de la sección de tubería 2005 veces en más de 30 sesiones distintas; la segunda foca, macho también, nadó a su través 927 veces en 17 sesiones, y la tercera (una hembra) atravesó nadando la sección de tubería 1227 veces en 25 sesiones. Ante nuestra desesperación, las focas no distinguieron un campo electromagnético del otro.





4. OJO DE LA FOCA COMUN; está diseñado para obtener la máxima sensibilidad y agudeza en tierra y en el agua. El cristalino esférico (*izquierda*) sirve para compensar que la córnea de una foca no refracte (es decir, no desvíe) las ondas luminosas en el agua: la luz conserva su trayectoria original al pasar por la córnea, pero luego aquélla se refracta al pasar por el cristalino muy curvado e incide en la retina en un ángulo que crea una imagen enfocada. En tierra, donde el poder refractante de la córnea de la foca provoca que las ondas luminosas se curven al pasar a su través, la forma del cristalino es desventajosa porque la luz se enfoca delante de la retina. La foca lo compensa con una pupila estenopaica: cuando los niveles de luz son elevados, como suele ocurrir cerca de la costa, la pupila se contrae hasta formar una rendija vertical (*derecha*). La pupila contraída aumenta la agudeza visual de manera muy parecida a como al cerrar el diafragma de una cámara fotográfica se aumenta la profundidad de campo. (Dibujos realizados por Patricia J. Wynne.)



5. DISTINTAS FACETAS DE LA FUNCION SENSORIAL de la foca común, estudiadas por la autora y sus alumnos en una serie de experimentos en el centro oceanográfico de Terranova. Con el primer experimento (*a*) pretendían determinar si las focas descubren a sus presas mediante un proceso de ecolocación. Se le presentaban dos anillas idénticas excepto por su densidad. En premio, la foca recibía arenques si distinguía correctamente entre las anillas. Los resultados sugieren que las focas podrían localizar por el eco. A continuación (*b*), la autora sometió a examen la sensibilidad de las vibrisas de las focas midiendo su respuesta ante una varilla vibradora. Aunque las vibrisas respondían a vibraciones de alta frecuencia, el recortarlas no tenía ningún efecto duradero sobre la capacidad del animal para capturar peces. Quizá las vibrisas funcionan como un medidor de velocidad. Se diseñó otro experimento (*c*) para ver si podían nadar a velocidad constante a través de una serie de aros. Los resultados muestran que lo consiguen, con vibrisas y sin ellas. En el último experimento (*d*) se probó la capacidad de las focas para detectar el campo magnético de la Tierra. Nadaban a través de una sección de tubería en la que el campo magnético podía desviarse 60 grados hacia el este al provocar una corriente eléctrica a través de una bobina de Helmholtz. Si la foca tocaba la boya situada a la izquierda cuando la bobina funcionaba y la boya derecha cuando no funcionaba, se la premiaba con arenques. Los resultados no nos permitieron, sin embargo, aclarar nada.

De ello no podemos, sin embargo, concluir que en su hábitat natural las focas no sean sensibles al campo magnético terrestre. Debe resaltarse que los resultados negativos son siempre difíciles de interpretar, porque obedecen, con frecuencia, a omisiones y errores metodológicos. Puede que las focas no llegaran a responder a las señales magnéticas que les proporcionamos porque el ambiente (un pequeño tanque de adiestramiento) era artificial.

Aunque hemos avanzado en el conocimiento de la biología de las focas, quedan muchos aspectos por entender. Es evidente que el animal, que atraviesa aguas sombrías y oscuras en busca de presas y pasa un tiempo considerable en tierra, posee receptores sensoriales insólitos o bien capacidades cognitivas extraordinarias. Siguen siendo cuestiones pendientes el saber si *Phoca vitulina* se basa en la ecolocación para detectar a las presas y otros objetos en el océano y si fía en el campo magnético terrestre para navegar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HARBOUR SEAL. Michael A. Bigg en *Handbook of Marine Mammals*, dirigido por Sam H. Ridgway y Richard J. Harrison. Academic Press, 1981.

ATTACHMENT BETWEEN HARBOUR SEAL (*PHOCA VITULINA*) MOTHERS AND PUPS. Deane Renouf, John Lawson y Linda Gaborko en *Journal of Zoology*, vol. 199, págs. 179-187; 1983.

SENSORY FUNCTION IN SEALS. D. Renouf en *Mechanisms and Evolution of Behaviour in Seals*, dirigido por D. Renouf. Methuen & Co., en preparación.

El trirreme navega de nuevo

Tras muchos años de paciente labor ha finalizado la reconstrución de la mítica nave de guerra griega. Las pruebas de mar han permitido demostrar que el trirreme pudo desarrollar el andar que le atribuyen los textos contemporáneos

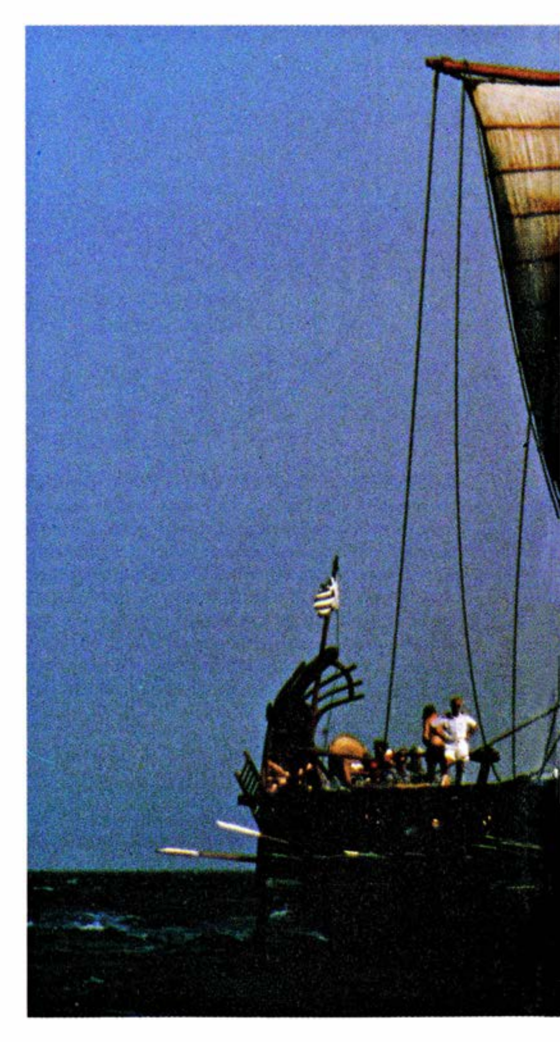
John F. Coates

En junio de 1987, cerca del antiguo puerto ateniense de El Pireo, tuvo lugar la botadura de la reconstrucción de una nave de guerra griega del tipo conocido por trirreme, el primero puesto a flote desde que desapareció, hace casi dos mil años. Un mes después, impulsado por 170 remeros de diferente nacionalidad, formación y destreza en el manejo del remo, el *Olympias* desarrolló un andar máximo de siete nudos, o sea, 13 kilómetros por hora. Navegando a toda velocidad, el radio de giro de la nave fue de 1,25 esloras (unos 46 metros), lo que coincide con los relatos antiguos sobre la capacidad de evolución de los trirremes. De todas las navegaciones, la más conocida es, seguro, el viaje de Atenas a Mytilene, sin escala ni detención alguna, citado por Tucídides, que tuvo lugar el año 427 a. de C. El recorrido fue de 340 kilómetros, unas 184 millas, y se cubrió en poco más de 24 horas, lo que representa una velocidad media de 7,5 nudos.

El trirreme de la antigüedad era muy maniobrero y llevaba un espolón de bronce con el que perforaba el casco de las naves enemigas durante el combate. En el 480 a. de C., los trirremes proporcionaron la victoria a los helenos del continente en la batalla de Salamina, frente a la flota persa, númericamente muy superior. La batalla fue una de las más decisivas de la historia del mundo occidental, porque, de haber sido derrotados, los griegos habrían caído bajo el dominio persa, impidiéndose así el desarrollo de ninguna de las grandes manifestaciones culturales de Grecia, de Atenas en particular, que tuvieron lugar posteriormente. Durante un siglo y medio el trirreme desempeñó un destacado papel en la defensa y protección militar de las naves mercantes en las aguas del Mediterráneo infectadas de piratas, favoreciendo las condiciones que permitieron a Atenas desarrollar el arte, la literatura y la filosofía que constituyen el legado griego al mundo occidental. Por todo esto, los escasos datos existentes en torno a una nave tan significativa han sido motivo permanente de preocupación por los eruditos. Por desgracia no se han encontrado restos del naufragio de ningún trirreme y las referencias literarias y artísticas que han llegado a nosotros son muy fragmentarias.

JOHN F. COATES ha dedicado buena parte de los últimos diez años al proyecto y construcción de la réplica del trirreme griego. Licenciado en ingeniería por la Universidad de Oxford trabajó en el proyecto, construcción y reparación de buques de la Marina Real británica, alcanzando el cargo de ingeniero naval jefe en 1976. Desde el momento en que se retiró, en 1979, viene dedicando toda su atención a la aplicación de la arquitectura naval al estudio del buque del pasado. Coates vive en Bath, Inglaterra.

Desde el Renacimiento, los investigadores no han cesado de discutir sobre las formas y características reales del trirreme, aunque muchos de los interrogantes suscitados durante los últimos cincuenta años los ha resuelto John S. Morrison, de la Universidad de Cambridge. A principios de la década de 1980, Morrison había seleccionado y analizado numerosos documentos literarios, epigráficos e iconográficos que le permitieron trazar un primer proyecto de un trirreme con un resultado muy esperanzador. Por aquella misma época, me encontraba aplicando al mismo caso toda mi experiencia en el proyecto de naves de guerra. Además, los trabajos de arqueología submarina realizados a principios de la década de 1970, cerca de Marsala, en Sicilia, por Honor Frost, de la Sociedad de Investigaciones Náuticas de Londres, habían puesto de manifiesto detalles muy valiosos sobre la forma y construcción de las naves longas de remo usadas en el Mediterráneo durante la antigüedad. La combinación de estos y aquellos datos delimitaron considerablemente el margen de las posibilidades del proyecto. Las cosas estaban así cuando, en 1981, Frank Welsh, banquero de Suffolk y escritor, interesado en trirremes desde hacía muchos años, propuso el Proyecto Trirreme, destinado a la construcción de una unidad a escala natural. Tanto Morrison como yo estábamos plenamente con-



1. *OLYMPIAS*, nombre del primer trirreme reconstruido. Hace 2500 años, la flota ateniense

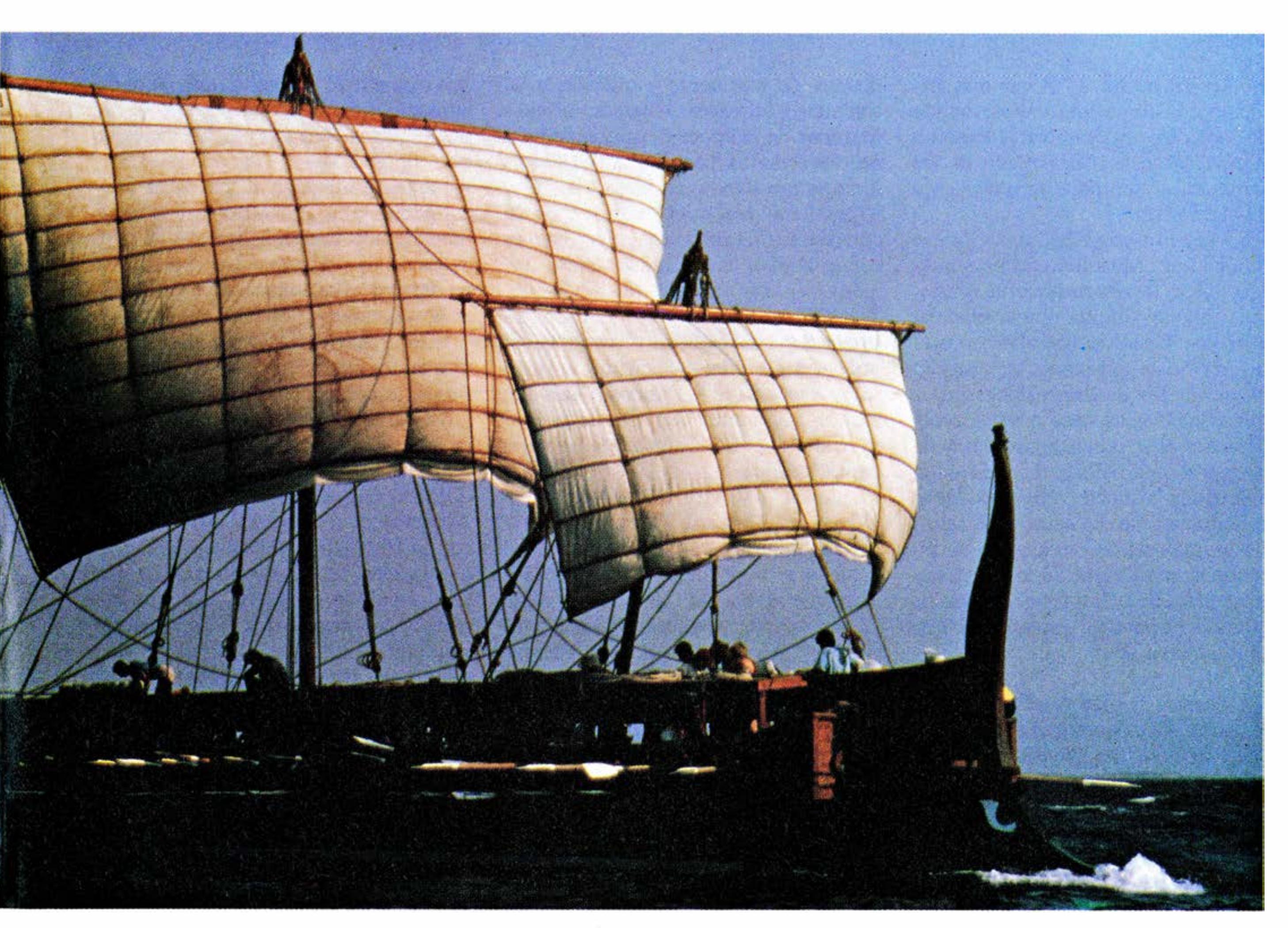
vencidos de que había llegado la hora de realizar un gran esfuerzo y ponerlo en marcha. Con fondos procedentes en su mayor parte de la administración griega, un constructor naval completó el *Olympias* en El Pireo, en 1987.

La nave que surgió tras cinco años de proyecto, investigación y ejecución es muy completa y refinada. Cierto es que el trirreme fue ya objeto de principal atención en la antigua Grecia y probablemente también en otros lugares del Mediterráneo oriental, desde el siglo VII a. de C. Ahora podemos comprobar que los antiguos constructores navales habían logrado un proyecto óptimo, dentro de los límites impuestos por los materiales y técnica disponibles en la época, sin los conocimientos actuales de hidrostática, estabilidad de naves, mecánica estructural, fisiología y física. Casi con toda seguridad, el trirreme fue la nave de remo más veloz jamás construida. La reconstrucción constituye una prueba de la habilidad técnica alcanzada en la antigua Grecia, cuyo nivel, en general, no fue superado hasta fines del siglo XVIII.

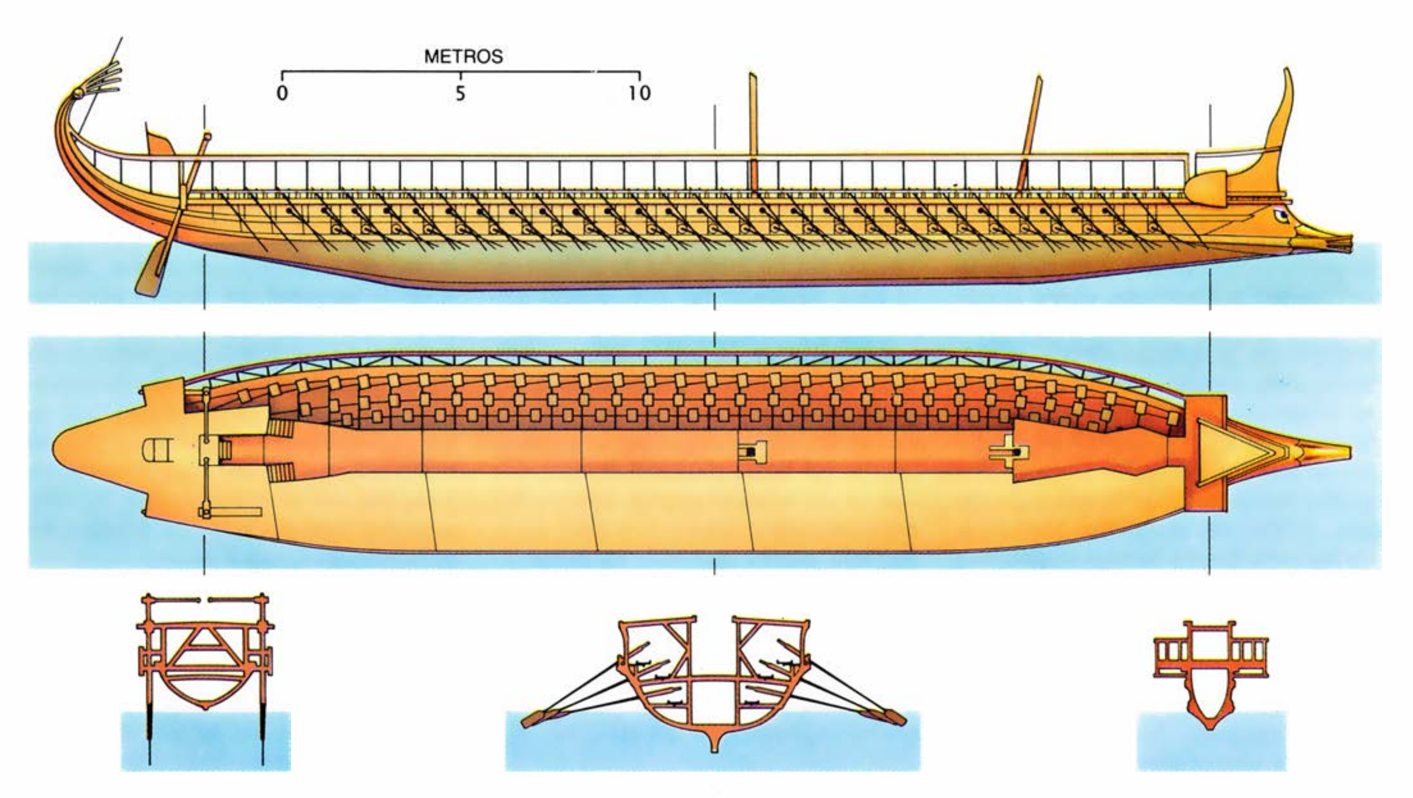
La construcción del *Olympias* costó 700.000 dólares y duró dos años. Hacia el 482 a. de C., Atenas, con una población de unas 250.000 personas, entre naturales, residentes extranjeros y esclavos, armó unos 200 trirremes. Este fue el resultado del gran esfuerzo exigido por un programa de armamento para satisfacer las necesidades impuestas por la guerra contra la ciudad-estado rival de Egina, aunque constituía, en realidad, el preludio de la segunda invasión persa. Nos muestra ello su capacidad de organizar la producción naval hasta un nivel comparable con el conseguido por el constructor norteamericano Henry J. Kaiser en la segunda guerra mundial. Es lamentable, pero no sorprendente, ante la inexistencia de toda documentación relativa a la industria de la antigua Grecia, que no subsista ningún detalle sobre el método empleado para alcanzar ese grado de producción tan elevado.

De acuerdo con las fuentes escritas contemporáneas, solamente las ciudades-estado más ricas de Grecia y Sicilia, así como las de Asia Menor bajo el dominio persa, estaban en condiciones de armar trirremes. Las demás debían contentarse con penteconteras de 50 remos. Las ciudades que construyeron los buques más caros, como fueron los trirremes, gozaron presumiblemente de la hegemonía militar, imposible de alcanzar por ningún otro medio. Los cálculos teóricos de las características principales de comportamiento de los trirremes y de sus predecesores mucho más pequeños indican que su maniobrabilidad —importante en el combate entre naves cuyo armamento principal era el espolón— no se diferenciaba apenas de la que poseían las penteconteras, más baratas.

La ventaja principal del trirreme era el desarrollo de un andar más elevado y su número mayor de tripulantes que las demás. Navegando a remo, los trirremes debieron desarrollar una velocidad del orden del 30 por ciento superior a las penteconteras. Esto les permitía alcanzar todas las naves de cualquier tipo existente y seleccionar la táctica ofensiva a adoptar en cada



compuesta por unidades de este tipo derrotó a la marina persa. Las características de la nave son: eslora, 36,8 metros; manga, 5,4 metros y puntal, desde la quilla a la cubierta superior, 3,6 metros. El desplazamiento a plena carga es de 45 toneladas. Los ojos pintados en la proa son el talismán contra los peligros.



2. VISTAS LONGITUDINAL, EN PLANTA Y DE VARIAS SECCIONES del *Olympias*, representadas a escala. Los 170 remeros iban distribuidos en tres órdenes o filas por banda: 31 en el de bancos situados más altos y 27 en cada uno de los dos niveles inferiores. Las seis filas estaban dispuestas en V, yendo el banco más bajo muy cerca de crujía, mientras el más alto se encontraba junto al costado. Los toletes de los remos superiores iban situados en una postiza. Los asientos de los remeros de los órdenes superior e inferior tenían una inclinación de unos pocos grados hacia dentro: los guiones de los remos eran equidistantes.

combate. El hecho de llevar más tripulación constituía una valiosa ayuda en las operaciones de tierra, aunque no hay indicios de la intervención de los remeros en el abordaje de naves enemigas en el mar.

Para nuestra sorpresa, todo parece apuntar a un origen del trirreme en la pentecontera de dos órdenes de remos, que llevaba dos filas de 12 y 13 remeros por banda. Las citas literarias no aluden nunca a la existencia de ninguna nave de guerra de dimensiones intermedias, salvo la excepción única recogida en la *Ilíada*, donde aparece una de 60 remeros por banda, dispuestos en dos órdenes o niveles distintos. ¿Por qué, entonces, se dio semejante salto, tanto en materia de coste como de dimensiones, para pasar de la pentecontera al trirreme? Es probable que los historiadores puedan responder a esta pregunta algún día.

De acuerdo con los resultados de las excavaciones realizadas hace más de cien años y que supusieron el hallazgo de los cimientos de las atarazanas de Zea, junto a El Pireo, donde se construyeron centenares de trirremes, es posible deducir que la manga de los mismos no podía superar los 5,6 metros y que la eslora debía ser de unos 37 metros. Por el texto de algunas inscripciones sabemos también que llevaban 170 remeros, un capitán, algo así como una docena de marineros y oficiales y 14 soldados y arqueros. Además, las citas literarias de la época permiten deducir que los remeros iban dispuestos en tres órdenes por banda, en filas de 31, 27 y 27 hombres, con asientos fijos y no de corredera. Lo que no está muy claro es cómo podían acomodarse tantos remeros en un espacio tan reducido. También fue muy debatido entre los especialistas en trirremes si estas naves podían desarrollar, navegando a remo sólo, la velocidad 9,5 nudos o más que indican las fuentes literarias de la época, o si requerían el auxilio de las velas para alcanzarla.

Apenas iniciado el proyecto del *Olympias*, Vernard Foley y Werner Soedel publicaron en esta revista el artículo más importante aparecido últimamente sobre el particular [véase "Las naves de guerra a remo en la antigüedad", por Vernard Foley y Werner Soedel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1981]. Este artículo aclaró algunos detalles relativos al trirreme. Los autores acertaron en destacar que se trataba de una nave extremadamente ligera con relación a su tamaño. Calcularon que el peso "era inferior a 40 toneladas", para una eslora de 121 pies (36,88 m). Luego redujeron ese peso aún más. Todas las reconstrucciones, incluso las que no han superado la fase de un simple proyecto sobre el papel, han supuesto un peso mucho mayor, lo que constituye un error que impedía apreciar el extraordinario grado de refinamiento alcanzado por las naves de este tipo. Foley y Soedel prestaron igualmente atención a los datos concernientes a la velocidad y maniobrabilidad, para lo cual la ligereza de peso es esencial. Sin embargo, no entraron en detalles ni calcularon numéricamente la velocidad y potencia de la nave.

Estaba claro que la mayoría de las indicaciones procedentes de fuentes literarias, inscripciones y representaciones artísticas eran muy valiosas para lograr la reconstrucción de un trirreme que fuera operativo. Hubo que determinar la forma del casco y de la estructura. Aspectos fundamentales que se conocen gracias a los restos arqueológicos encontrados en el Mediterráneo, que han permitido establecer la forma del casco y la estructura de las naves de vela tanto mercantes como de las longas a remo de guerra. Todos estos detalles, con las exigencias impuestas por las leyes de la física, hicieron posible deducir la forma y estructura del trirreme, con un margen de error muy reducido, y en todo caso circunscrito a unos pocos centímetros en la manga y a algunos decímetros en la eslora.

Habida cuenta de la rigidez en que nos movíamos, parecía razonable confiar la solución de ciertos detalles al avance del proceso de construcción. Todo el mundo admitía, por ejemplo,

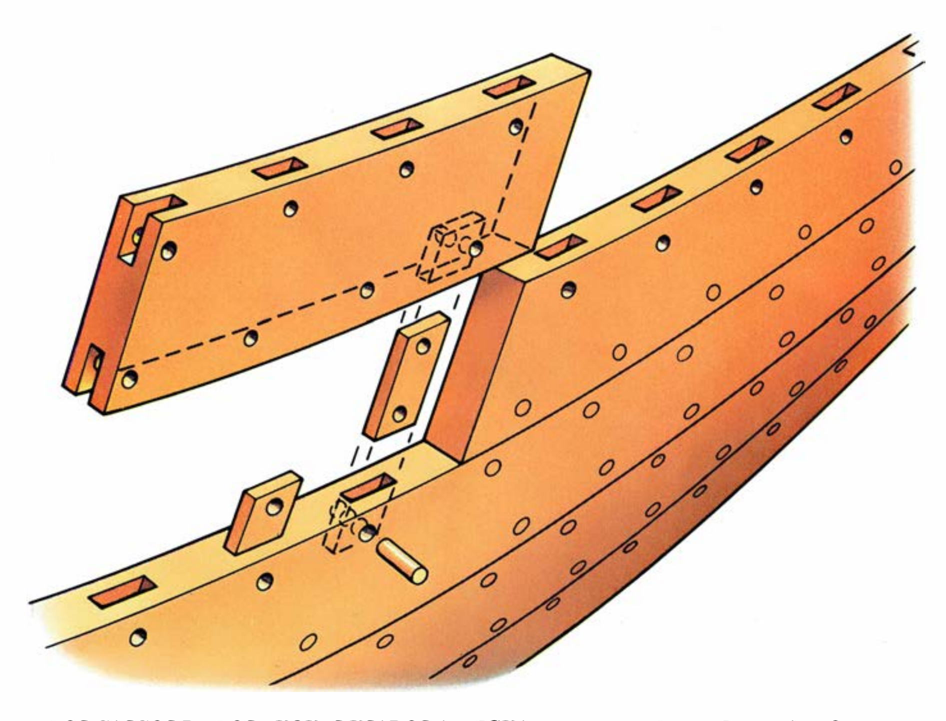
que los trirremes debían llevar lastre para mantenerse adrizados, a causa de la considerable altura de la obra muerta, impuesta por la necesidad de situar convenientemente los tres órdenes de remeros. Sin embargo, como los relatos de batallas navales mencionan que los vencedores remolcaban los restos de las flotas derrotadas y, además, la palabra griega que normalmente se traduce por "hundido" puede significar también "inundado", tal y como Augustin F. B. Creuze observó en la Encyclopædia Britannica en 1841, donde dice que "las naves que se dan como hundidas estaban simplemente destrozadas y llenas de agua", es lícito suponer que no llevaban ningún lastre o, en todo caso, en cantidad insuficiente para que la estructura de madera se hundiera hasta el fondo. Además, el lastre habría implicado un aumento de peso, lo que no era deseable en una nave rápida. Así, no es de extrañar que sintiéramos una gran satisfacción al descubrir, durante el proyecto de la reconstrucción, que los trirremes no necesitaban llevar ningún lastre para tener buena estabilidad. Esto reduce, lamentablemente, las posibilidades de encontrar restos del naufragio de algún trirreme en el fondo del Mediterráneo y, aunque exista siempre un reducido margen de probabilidades, no es lógico suponer que se produzca.

El peso de un buque es igual al del agua que desaloja, según establece el principio de Arquímedes. Para nosotros, el principal problema del proyecto era diseñar una unidad que, en las condiciones normales de carga, flotara de modo que los remos trabajaran adecuadamente. Esto obligó a un diseño esmerado del casco, puesto que tanto la forma como el peso son los determinantes básicos del desplazamiento y flotación de la nave. Ambos elementos guardan, además, una estrecha vinculación con los métodos reales de construcción empleados en la época. En este aspecto, las naves de remo excavadas por Frost han resultado vitales para la reconstrucción.

Todos los proyectos de trirremes realizados hasta ahora suponían un casco que adolecía del error fundamental de atribuirle un peso excesivo, por cuanto estaba inspirado en las galeras medievales u otras naves de madera aún posteriores, e incrementado, además, por la circunstancia de suponer la existencia de lastre a bordo. En lo que ahora conocemos por construcción naval tradicional en madera, el casco se trabaja montando primero la estructura —quilla, roda y codaste—, a la que se añaden luego las numerosas cuadernas a modo de costillas. Estas se recubren con tablas clavadas o fijadas a la parte exterior de las mismas; es muy frecuente también que el interior de las cuadernas se recubra con un forro de tablas. La estanqueidad del casco se consigue con la introducción, a golpes de maceta, de la materia de calafatear, consistente generalmente en una mecha de cáñamo o algodón, hasta que quede bien apretada entre las tablas y les impida toda posibilidad de moverse, a causa de las fuerzas de fricción que el propio calafateo es susceptible de generar. La estructura cuenta también con unos miembros interiores de refuerzo, dispuestos longitudinalmente: la sobrequilla, por encima de la quilla, y las curvas horizontales situadas a cada lado de la cabeza de los baos. En esencia el buque se construye desde dentro hacia afuera.

En el Mediterráneo, hasta la última mitad del primer milenio después de Cristo, las naves y embarcaciones se construían empezando por el forro, por un procedimiento bien distinto del actual, muchos de cuyos detalles nos son totalmente desconocidos. Este sistema de construcción implica la sujeción de las tablas por los bordes, fijando cada una, en el momento de colocarla, a la adyacente situada más abajo, hasta completar el casco y cuya obra se iniciaba por la quilla. Las tablas se fijaban entre sí mediante numerosas mechas, cuñas o espigas de madera dura introducidas a presión en rebajes individuales a propósito, labrados en el canto de las tablas, método que denominamos de mecha perdida. La cuña se sujetaba en posición mediante una clavija pasante en cada extremo. El sistema, muy laborioso, conseguía una unión muy fuerte, formando las tablas así ensambladas un verdadero casco, en el sentido estricto de la palabra, capaz de soportar grandes esfuerzos en el plano de cualquiera de sus elementos. La excavación de varias naves antiguas en el Mediterráneo ha confirmado plenamente la utilización del sistema de unión que acabamos de aludir.

En el mencionado sistema de construcción, el forro podía ser más delgado que el empleado en el procedimiento tradicional de empezar la obra por los elementos estructurales, puesto que era mucho más resistente. Por esta misma razón, las cuadernas eran muchísimo más delgadas, pues su propósito quedaba limitado a evitar cualquier posible deformación del casco. Tales cuadernas, compuestas generalmente por tres piezas no unidas entre sí, se iban colocando a medida que la superficie del casco se extendía lo suficiente para poder acoplarlas. Su función no era la de mantener el forro unido, como sucede en la construcción más moderna, que, además de ser mucho más barata, responde a un concepto muy simple. El trirreme podía llevar 170 remeros a bordo por la simple razón de que el método de construcción empleado no re-



3. LOS CASCOS DE LOS BUQUES USADOS ANTIGUAMENTE EN EL MEDITERRANEO se construían mediante la unión de las tablas por los bordes insertando mechas, cuñas o espigas en rebajes adecuados e independientes, que se fijaban con dos clavijas de madera. La construcción del casco se hacía empezando por la quilla y, una vez colocada la suficiente extensión de forro, se instalaban las cuadernas.

quería en su interior la existencia de miembros estructurales de gran robustez, tanto en el sentido longitudinal como en el transversal.

Ese método de construcción permitía lograr un casco ligero de peso, cuyo desplazamiento fuera tan reducido que la línea de flotación resultara la adecuada, con el trirreme completamente cargado. La sección transversal del casco tenía la forma de una copa de champaña de boca ancha, necesaria para colocar satisfactoriamente las cuñas de unión de las tablas de la aparadura con la quilla y formar un elemento rígido a lo largo de la parte central del plan de la nave. Además, la superficie situada por debajo de la flotación, en la zona donde la sección transversal del casco aparece más redondeada, es bastante pequeña y el desplazamiento queda así reducido a unas 40 toneladas; muy poco para una nave con una eslora en la flotación algo mayor de 30 metros. En un casco de líneas más modernas, con fondo plano y pantoque redondeado, pero con idéntica manga y calado, el volumen sumergido sería considerablemente mayor, hasta el extremo de alcanzar un desplazamiento de 70 toneladas o más.



4. VISTA DEL CASCO del *Olympias* donde se aprecia la construcción esmerada y el poco calado de la nave. Las portas o chumaceras de los remos inferiores llevan una protección de piel; con ésta se pretende evitar la entrada del agua, toda vez que las portas se encuentran sólo a 0,4 metros por encima de la línea de flotación. Una postiza dispuesta a cierta distancia del casco proporciona el fulcro adecuado a los remos del orden superior. En primer término el autor (*en medio*) comenta, tiza en mano, la forma del espolón con unos colegas.

Mientras desarrollábamos el proyecto se puso de manifiesto que tanto la sección del casco como el método de construcción empleado en la antigüedad satisfacían ulteriores requisitos. Las cuñas, mechas o espigas y las clavijas eran imprescindibles para absorber convenientemente las tensiones generadas por la desigual distribución de pesos y de flotabilidad a lo largo de la eslora. La pesada quilla y las tablas adyacentes que formaban el fondo de la sección transversal, que ya hemos dicho era semejante a una copa de champaña, proporcionaban al casco el puntal suficiente para que tuviera la debida resistencia longitudinal a la flexión. La sección del casco tenía igualmente la manga en la flotación adecuada, pese a su volumen reducido, para proporcionar la estabilidad requerida. La proyección vertical de la quilla por debajo del fondo ofrecía la resistencia lateral oportuna para que se comportara debidamente durante la navegación a vela. La sección del casco presentaba, además, la línea precisa para dar cabida a los remeros, que iban situados de modo que la fila de cada orden o nivel quedara por encima y más hacia fuera de la inmediata inferior. Finalmente, este tipo de sección debía facilitar la limpieza, reparación y protección del forro de la obra viva de la nave, una vez puesta en seco en varaderos y playas.

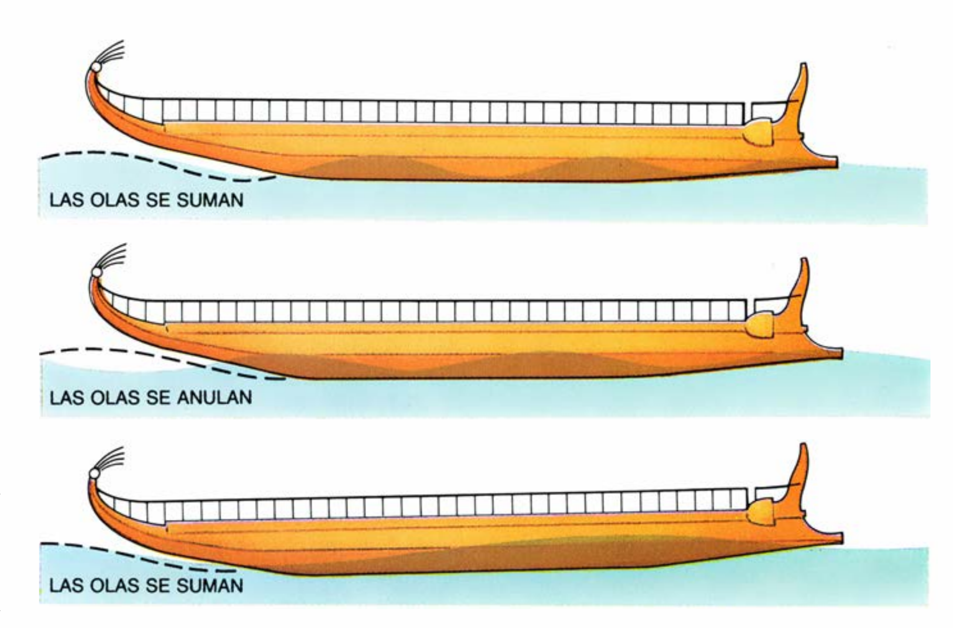
Descubrimos que el casco del trirreme, siendo tan largo y estrecho, se vería sometido a unos esfuerzos de flexión próximos al límite que la estructura de madera podía soportar. A ello contribuía la falta de cubierta que soportara las tensiones de la parte alta de los costados y contribuyera a evitar que la quilla se curvara por el centro y terminara por partirse en dos. Los trirremes llevaban unos tortores o cabos de lino (*hypozomata*) dispuestos longitudinalmente, a los que se daba vueltas hasta dejarlos bien tensos, con el fin de reducir así los esfuerzos de la parte superior del casco. En experimentos realizados con modelos reducidos descubrimos que los cabos de lino cedían al estar sometidos a una tensión constante, rompiendo de forma imprevisible, por lo que decidimos utilizarlos de fibra sintética. La falta de tiempo nos impidió resolver algunos problemas relativos a la jarcia de la nave real y tuvimos

que soslayarlos temporalmente con el uso de cables de acero.

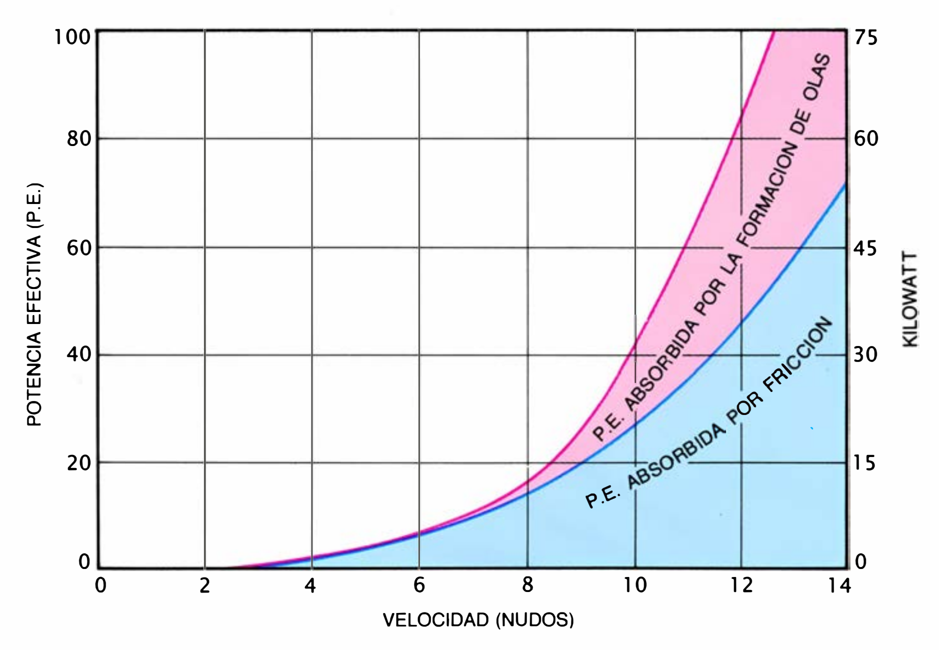
La virtud principal del trirreme era la velocidad. Al proyectar la reconstrucción descubrimos que tenía la eslora y la forma del casco más idóneas para presentar la mínima resistencia al avance en el agua. Si exceptuamos las embarcaciones modernas de mucha potencia, en los demás casos el componente principal de la resistencia se debe a la viscosidad del agua o resistencia de fricción. Dicha resistencia es proporcional a la superficie mojada y rugosidad del casco, y está en función de la velocidad elevada al exponente 1,825. Tal y como explicaron Foley y Soedel, las olas engendradas por el movimiento de un buque en el agua producen una segunda clase de resistencia. A velocidad reducida, los efectos de estas olas son despreciables, pero a velocidad elevada constituyen la mayor parte de la resistencia total.

La resistencia por la formación de olas varía en relación con la forma del casco, el desplazamiento, la eslora y la velocidad. Con la nave en movimiento, las olas se forman constantemente en la proa y en la popa, adoptando un modelo o figura típica alrededor del buque mientras éste avanza. Las olas se desplazan con la nave; las de la proa empiezan con una cresta, las de la popa con un seno. A medida que la velocidad de la nave aumenta, las olas de la proa y la popa varían entre encontrarse en fase y estar totalmente desfasadas. La resistencia por la formación de olas aumenta con la velocidad de la nave y lo hace más rápidamente cuando las generadas a proa están en fase con las de popa (coincidencia que contribuye a reforzar sus efectos); en estas condiciones, es necesario incrementar mucho la potencia para lograr un leve aumento de la velocidad. Por el contrario, cuando las olas de la proa están desfasadas con respecto a las de popa, estas últimas son apenas perceptibles y la resistencia aumenta con menos rapidez, de modo que es más fácil conseguir que la nave ande a más velocidad.

Eslora y velocidad del buque determinan, pues, la interacción entre las olas de proa y las de popa, y, con ello, la resistencia por la formación de las mismas. Es de destacar también que la eslora del trirreme es tal que el incremento de la resistencia debida a la formación de olas aumenta muy poco en el entorno de la velocidad máxima, que es de 9,5 a 11 nudos y que el buque es suceptible de alcanzar navegando a remo, como consecuencia de la aplicación de un gran esfuerzo, aunque normalmente de corta duración. Para conseguir el siguiente sector de formación de las olas cuya resistencia aumente con lentitud, calculé que sería preciso dar a la nave un 50 por ciento más de eslora, en cuyo caso la tripulación podía ser de unos 250 remeros; de todos modos, lo más importante es que el aumento de velocidad sería muy leve. En cualquier caso, el intento fracasaría por insuficiencia de resistencia a la flexión longitudinal, capaz de impedir que el casco se partiera por la mi-



5. LA RESISTENCIA POR LA FORMACION DE OLAS aumenta cuando las generadas permanentemente en la roda se combinan con las del codaste (*línea de trazos*). Navegando a poca velocidad el efecto es despreciable, pero a medida que ésta aumenta la longitud de la ola de proa crece, de modo que éstas y las de popa pasan alternativamente de encontrarse en fase (*arriba*) a estar desfasadas (*en el centro*). Cuando las olas están en fase, la resistencia aumenta muy rápidamente; en cambio, cuando están desfasadas, el incremento es menos rápido. Se da también el caso de que el buque alcanza una velocidad tal que la mitad de la longitud de la ola de proa es igual a la eslora de la nave (*abajo*). Esta velocidad crítica se puede incrementar dando más eslora a la nave. En la ilustración, la altura de la ola se ha exagerado a propósito para mayor claridad.



6. POTENCIA EFECTIVA necesaria para propulsar el *Olympias* a diferentes velocidades; se calculó sometiendo a prueba un modelo en el canal de experiencias de la Universidad Nacional Técnica de Atenas. La superficie azul indica el porcentaje de la potencia total correspondiente a la resistencia de fricción. La superficie en rojo, en cambio, se refiere a la potencia total necesaria para vencer la resistencia por la formación de olas. El gráfico muestra que, a la velocidad de siete nudos desarrollada por el buque en 1987, la potencia efectiva máxima fue de 10,5 kilowatt, es decir, 0,062 kilowatt por persona. De alcanzar la media de los remeros de los cúters ligeros de la Marina de los Estados Unidos, que es de 0,128 kilowatt por persona (21,8 kilowatt para la tripulación) el trirreme andaría 9,3 nudos, siempre que llevara los timones izados.

tad. El trirreme tenía la eslora precisa para ser operativo y desarrollar la máxima velocidad.

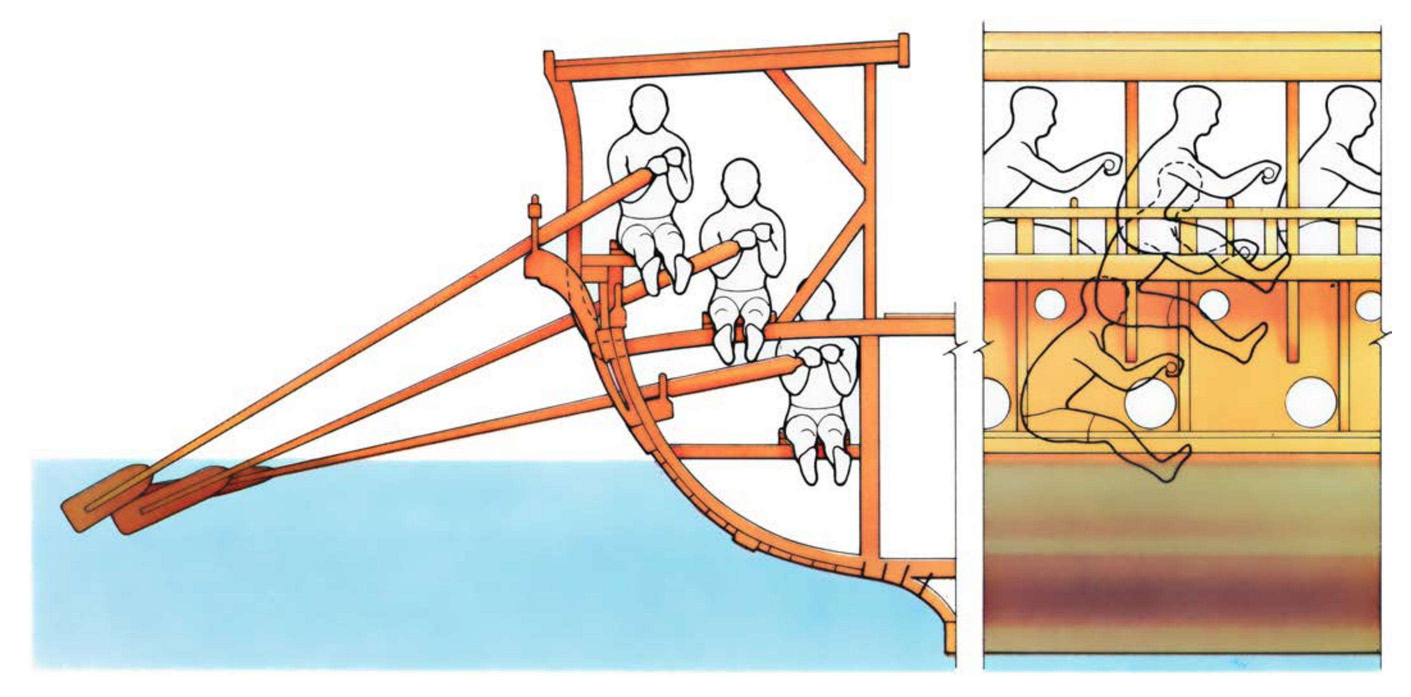
El comportamiento del trirreme no sólo viene determinado por su tamaño, forma y estructura, sino también por la fuerza que desarrolla una tripulación de 170 remeros, los cuales constituyen la base que asocia la potencia con la velocidad y la mecánica de la boga con asiento fijo en una nave de remo de mucho andar. La velocidad máxima de los trirremes debía exigir también que los remos tuvieran la masa, equilibrio, superficie de la pala y la debida proporción entre el largo de la parte de fuera y la de dentro, medidas desde el punto de apoyo del mismo. En remos de elevado rendimiento, estos aspectos son capitales, tal y como sabe perfectamente cualquier remero que participe en regatas, y los del trirreme no constituyen ninguna excepción. Otras reconstrucciones más hipotéticas han supuesto unos remos que constituían una dura carga para los remeros.

Por los inventarios de los antiguos astilleros de la ciudad de Atenas, algunos de los cuales aparecen grabados en lápidas encontradas en El Pireo, sabemos que los remos de los trirremes del tercer cuarto del siglo IV a. de C. tenían 9 y 9,5 cúbitos de largo, es decir, 4,0 y 4,22 metros. Cada remo lo manejaba un solo hombre; los más cortos iban en las cabezas del trirreme. El ingeniero y arquitecto naval romano Vitruvio indica que, en el siglo I a. de C., la separación entre los remos era de dos cúbitos, es decir, de 0,888 metros. Además, hay dos representaciones antiguas que se consideran muy fidedignas en cuanto a la disposición de los remos. Una de ellas es el relieve de Lenormant, del siglo V a. de C., labrado en una lápida de piedra caliza procedente de la Acrópolis y que reproduce una parte del costado de un trirreme. El otro es el vaso de Ruvo, una crátera ática decorada en rojo, donde aparecen representados los Argonautas a bordo de una nave que Morrison identificó como un trirreme y que proporcionó información sobre las portas o chumaceras de los remos correspondientes a los dos órdenes inferiores de boga, así como de la postiza en que se apoyan los del orden superior.

Como el recorrido máximo del puño de los remos era de 0,85 metros y el ritmo de boga, también máximo, de 50 paladas por minuto, para los remos de las dimensiones antes aludidas, deducimos que, para desarrollar un andar de 9,5 nudos, la proporción entre la longitud de la parte interior y exterior del remo debía ser bastante elevada y del orden de uno a tres. Además, la manga en la flotación debía oscilar alrededor de unos 3,7 metros para que, en la condición de plena carga, el centro de gravedad quedara unos 0,8 metros por encima de la flotación y la nave gozara de la debida estabilidad. El orden de remos inferior debía estar a 0,4 metros, como mínimo, por encima de la superficie del agua, para actuar con eficacia en condiciones normales de oleaje, aunque, de todos modos, las chumaceras de estos remos iban protegidas con un pedazo de piel. A partir de las experiencias de boga realizadas con una sección del casco a tamaño natural, descubrimos que los remos del orden superior tenían una inclinación menor de 35 grados con respecto a la horizontal; para ángulos mayores, el rendimiento del remo era menor.

Todas estas consideraciones sobre las características de los remos han permitido llegar a una conclusión en lo concerniente al viejo debate sobre si el trirreme debía navegar a remo y vela conjuntamente para alcanzar la máxima velocidad. La respuesta es decididamente no. Salvo en el caso de unas condiciones de viento muy particulares, la mayoría de las veces las velas harían escorar al trirreme, de modo que los remeros del orden inferior de la banda de sotavento se encontrarían con los puños de los remos presionándoles en el regazo, lo que les impediría sacar las palas fuera del agua en la fase de la boga que así lo requiere.

¿Cuál es la potencia efectiva generada por la tripulación de un trirreme? Las estadísticas sobre el rendimiento de los remeros utilizando asientos fijos son muy escasas. Una fuente la proporciona la regata de cúters ligeros y asiento fijo de la Marina de los Estados Unidos, cuyas características fueron normalizadas hace muchos años y que se utilizan en competiciones de tres millas náuticas de recorrido. Tras someter a prueba un modelo estandarizado de cúter en un canal de experiencias para determinar su resistencia, se comprobó que, cubriendo un reco-

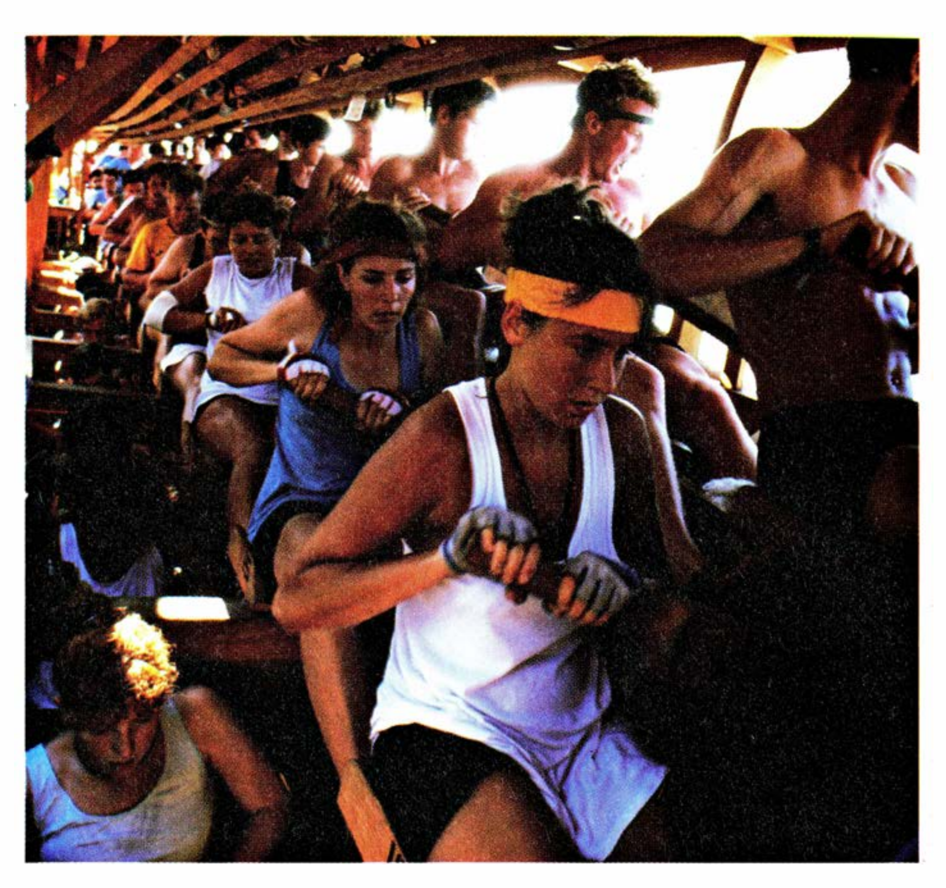


7. DISPOSICION DE LOS REMOS, en la sección transversal (*izquierda*) y en la vista lateral (*derecha*). El casco necesitaba que los costados tuvieran cierta inclinación hacia fuera para alojar a los remeros. La postiza, en la parte alta, permite que el fulcro de los remos del orden superior diste 0,6 m del costado.

rrido de tres millas a siete nudos, la tripulación de 12 remeros desarrollaba una potencia efectiva de 2,05 caballos de vapor, o 1,53 kilowatt, lo que representa un promedio de 0,128 kilowatt por hombre.

Si consideramos que el rendimiento de los remeros del trirreme era tan bueno como el de los tripulantes del cúter de la Marina de los Estados Unidos, podemos calcular que los 170 remeros habrían generado un total de 21,76 kilowatt durante 25 minutos, que es la duración de la regata de cúters. De acuerdo con esta potencia es posible deducir que la velocidad de la nave sería de 9,3 nudos, en el caso de llevar los timones izados, o de 8,6 nudos, manteniéndolos calados, como deberían ir en el supuesto de pretender que la nave fuera capaz de maniobrar al instante. Durante las pruebas de mar realizadas en 1987, con una tripulación muy heterogénea, se logró hacer avanzar al *Olympias* a casi siete nudos durante un corto recorrido, llevando los timones calados y después de 25 horas de entrenamiento.

La potencia efectiva máxima fue de 0,062 kilowatt por remero, la mitad de la media de los que bogan en los cúters de la Marina de los Estados Unidos. La tripulación del trirreme, sin embargo, tenía el inconveniente de estar formada por un conjunto de gente no sólo de distinta experiencia y habilidad, sino también de desigual longitud de piernas y capacidad para adaptarse a la boga con asiento fijo, que requiere una notable flexión del cuerpo para dar el recorrido adecuado a la pala. Los asientos de corredera permiten aumentar el recorrido de las piernas y evitan en gran parte la flexión del cuerpo. Además, los remos no estaban equilibrados en absoluto, de modo que cada remero debía aplicar 20 watt, como mínimo, para levantar la pala y sacarla del agua. Durante la segunda serie de pruebas realizadas en 1988, con la gente mucho más entrenada, la nave anduvo a casi nueve nudos. Por tanto, la velocidad máxima que indican las fuentes es muy verosímil que se pueda alcanzar con remeros bien adiestrados.



8. UNA TRIPULACION DE VOLUNTARIOS MUY HETEROGENEA aparece distribuida en los estrechos bancos de boga del *Olympias*. Los asientos son fijos, van forrados de piel y los remos están hechos de pino.

Después de las pruebas quedó muy claro que, si se quería aprovechar todo el esfuerzo de la boga, los remos debían ser del tipo adecuado. Además, toda reconstrucción debe hacerse utilizando la tecnología propia de la época, lo que excluye el empleo de colas a prueba de agua y la de piezas facticias. Los autores contemporáneos aluden al empleo de remos de abeto, que es una madera excelente para el caso, por cuanto es ligera y muy rígida. A 50 paladas por minuto, la energía cinética del movimiento del remo, muy considerable, exige que el momento de la masa del mismo con respecto al fulcro sea lo más pequeño posible.

Con un brazo de palanca de tres a uno es imposible conseguir un equilibrio del remo satisfactorio, salvo en el caso de utilizar abeto o de poner un contrapeso en el guión. El contrapeso aumenta la masa del remo y probablemente constituiría un problema en el caso de una boga muy rápida; por otro lado, las fuentes antiguas nada indican de su existencia; es de suponer que, de haberse utilizado, habríamos encontrado alguna alusión en cualquier parte. Finalmente, con una proporción de tres a uno y un guión convenientemente equilibrado, de manera que se pudiera sacar la pala del agua aplicando una fuerza hacia abajo inferior a 3,63 kilogramos, que es la normal en remos de competición, la flotabilidad de la pala del remo debe ser poco más de 1,2 kilogramos para que quede sumergida en gran parte cuando el remero no actúa sobre el puño. Esto obliga a que el volumen de las palas sea pequeño, algo difícil de conseguir, salvo que se hagan de una superficie muy reducida o extremadamente delgadas, lo que va en contra de la debida resistencia.

El desarrollo de un andar superior a los 9,5 nudos dependerá básicamente de la calidad de la tripulación y de que los remos estén proyectados del mejor modo posible. También el casco debe ser liso. En cualquier caso, las tripulaciones necesitarán realizar mucho tiempo de prácticas y de adaptación antes de que el *Olympias* emule los originales antiguos. La investigación tendente a encontrar el remo óptimo prosigue y el resultado servirá para demostrar el grado de perfección alcanzado por el trirreme para desarrollar tal velocidad.

Con la reconstrucción del trirreme y la demostración de que la obra obtenida está de acuerdo con las fuentes arqueológicas, la literatura antigua y las representaciones artísticas existentes, los autores hemos superado la primera prueba, que es la de la autenticidad. Queda pendiente de demostrar si es posible conseguir, al remo, el grado de rendimiento que atestigua la literatura de la época, así como el que se puede deducir con la experimentación y el empleo de la física actual. Pretendemos mantener un andar constante de 7,5 nudos durante todo un día, con el fin de emular el legendario viaje de 24 horas desde Atenas a Mytilene. Otro objetivo es la velocidad de 9,5 nudos en un recorrido de tres millas marinas,



9. LOS TRES ORDENES de remeros bogan con fuerza para que el *Olympias* desarrolle la máxima velocidad. En las pruebas de mar quedó demostrado que la nave era capaz de superar los nueve nudos navegando a remo o a vela. Algunos instructores, informadores y asistentes aparecen de pie en la cubierta superior.

que es la correspondiente a las estadísticas de los cúters de regatas de la Marina de los Estados Unidos.

El *Olympias* ha demostrado, amplia y óptimamente, su maniobrabilidad en el Egeo a lo largo de los dos últimos años. Queda todavía pendiente realizar con resultado plenamente satisfactorio la prueba de ciar, maniobra aplicable no sólo después de espolonear una nave enemiga, sino también en otras muchas circunstancias del combate. Buscamos, asimismo, medir y convertir la maniobrabilidad del trirreme en datos susceptibles de introducir y analizar por computadora, lo que permitirá transformar el estudio de las tácticas del trirreme en una base cuantificable. El comportamiento del *Olympias* a vela no se ha evaluado plenamente, aunque está muy claro que responde mucho mejor al aparejo cuadro de lo que puede suponer un observador actual. El estudio del comportamiento a vela permitirá conocer el modo como las flotas surcaron el Mediterráneo antiguo.

Por ser el trirreme el arquetipo que condicionó el desarrollo de las naves longas a remo para uso bélico, los conocimientos y la experiencia obtenida con la reconstrucción del que nos ocupa servirán de base para llevar a término el proyecto y la posible reconstrucción de la más importante de estas últimas, el quinquerreme, una nave de tres órdenes de remeros, con dos hombres por remo en los dos superiores y uno solo en el inferior. La construcción y el estudio de las experiencias a realizar con el *Olympias* —y posiblemente con otras naves similares también reconstruidas— nos ayudarán a obtener un conocimiento más claro y práctico del ejercicio del poder naval en el Mediterráneo, que con tanta vitalidad determinó el curso de la historia en la Grecia clásica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GREEK OARED SHIPS, 900-322 B.C. J. S. Morrison y R. T. Williams. Cambridge University Press, 1968.

SHIPS AND SEAMANSHIP IN THE ANCIENT WORLD. Lionel Casson. Princeton University Press, 1971.

FIRST SEASON OF EXCAVATION ON THE PUNIC WRECK IN SICILY. Honor Frost en *International Journal of Nautical Archaeology and Undersea Exploration*, vol. 2, n.º 1, págs. 33-49: marzo y septiembre de 1973.

ARCHAEOLOGY BENEATH THE SEA. George F. Bass. Walker & Co., 1975.

THE ATHENIAN TRIREME: THE HISTORY AND RECONSTRUCTION OF AN ANCIENT GREEK WARSHIP. John S. Morrison y John F. Coates. Cambridge University Press, 1986.

Los niños de la isla Jardín

En 1955, 698 infantes nacidos en la isla hawaiana de Kauai empezaron a participar en un estudio de 30 años de duración que ha demostrado que algunos individuos triunfan sobre las desventajas físicas y la miseria moral de su entorno

Emmy E. Werner

Kauai, la isla Jardín, está situada en el extremo noroeste del archipiélago hawaiano, a 100 millas y a media hora de vuelo de Honolulú. Sus 1427 kilómetros cuadrados abarcan montañas, acantilados, desfiladeros, frondosas selvas y playas de fina arena bañadas por un mar que las acaricia con altas y pausadas olas. Los primeros polinesios que cruzaron el Pacífico para establecerse allí en el siglo VIII se sintieron prendados de la belleza de la isla, lo mismo que las generaciones de navegantes que la visitaron después de que el capitán James Cook la "descubriera" en 1778.

La mayoría de los 45.000 habitantes de Kauai descienden de inmigrantes venidos del sudeste asiático y de Europa, gentes que llegaron a la isla para trabajar en las plantaciones de caña de azúcar con la esperanza de conseguir para sus hijos una vida mejor. Gracias al inigualable espíritu de cooperación de los kauaianos, mis colegas Jessie M. Bierman y Fern. E. French, de la Universidad de California en Berkeley, Ruth S. Smith, psicóloga clínica establecida en Kauai, y yo misma hemos podido llevar a cabo en la isla un estudio longitudinal que ha durado más de tres décadas. Nuestra investigación se fijó dos objetivos principales: evaluar las consecuencias a largo plazo del esfuerzo prenatal y perinatal y documentar los efectos de una primera crianza en condiciones adversas sobre el desarrollo físico, cognitivo y psicosocial de los niños.

EMMY E. WERNER es profesora de formación humana y psicóloga infantil de la Universidad de California en Davis. Se doctoró en 1955 por la de Nebraska. Ha sido colaboradora en la sección de estudios perinatales del Instituto Nacional de la Salud desde 1959 hasta 1962 y psicóloga infantil de la Escuela de Salud Pública de la Universidad de California en Berkeley, de 1965 a 1969. Ejerce la docencia en Davis desde 1962.

El "Estudio Longitudinal sobre Kauai" se empezó en una época en la que aún era bastante raro que alguien se dedicase a examinar el desarrollo de niños expuestos a factores de riesgo biológico y psicosocial. Por entonces, los investigadores intentaban reconstruir los hechos que conducían a problemas físicos o psicológicos estudiando el historial de los sujetos en los que esos problemas habían ya aparecido. Este enfoque retrospectivo puede dar la impresión de que el resultado es inevitable, puesto que así sólo se toman en cuenta las "víctimas" y no los "supervivientes". Teníamos la esperanza de que evitaríamos tal sesgo si controlábamos el desarrollo de todos los niños de una comunidad entera que hubiesen nacido en un período determinado.

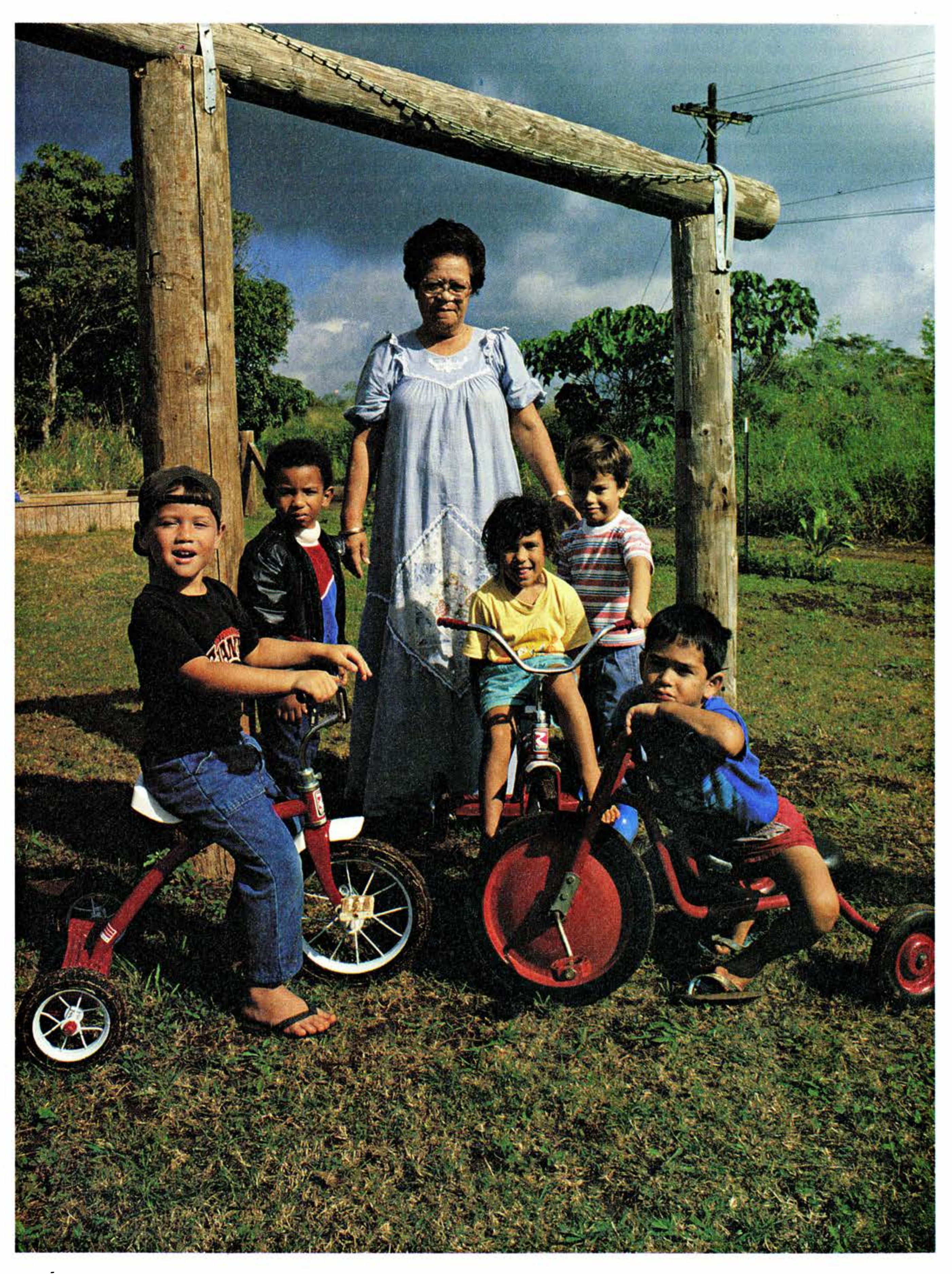
Comenzamos a trabajar en 1954 con una evaluación de los historiales reproductivos de todas las mujeres que había en la comunidad. Según los informes de las kauaianas, en los años 1954, 1955 y 1956 se registraron en la isla 2203 embarazos, que se resolvieron en 240 muertes fetales y 1963 criaturas vivas. Decidimos estudiar el conjunto de los 698 infantes nacidos en Kauai en 1955 y fuimos siguiendo el desarrollo de estos individuos a las edades de uno, dos, 10, 18 y 31 o 32 años. La mayoría de los individuos de este conjunto —o sea, 422 de ellos— habían nacido sin complicaciones, a seguida de embarazos sin incidentes, y se criaron en ambientes acogedores.

Conforme nuestro estudio iba progresando, empezamos a interesarnos en especial por ciertos niños de "elevado riesgo", los cuales, a pesar de haber estado expuestos a los inconvenientes del esfuerzo reproductivo, de la vida en hogares pobres, mal avenidos y sin educación, con padres alcohólicos o mentalmente perturbados, lograron desarrollar una personalidad sana, tener carreras o profesiones estables y disfrutar de sólidas relaciones interpersonales. ¿Qué factores de protección y apoyo contribuyeron a que estos niños en apariencia vulnerables resistieran y superaran tanta adversidad?

Encontrar una comunidad que sea capaz de cooperar en un empeño semejante y que se preste gustosa a ello no es tarea fácil. Elegimos Kauai por muchas razones, entre las que no fue de las de menos peso la receptividad de la población isleña respecto a nuestros planes. El respaldo que nos dieron los servicios médicos, de salud pública, pedagógicos y sociales que funcionaban en la isla podía compararse con el que se solía hallar entonces en comunidades de similar tamaño en el territorio continental de los EE.UU. Por otro lado, nuestro estudio tendría en cuenta cómo influyen las diversas culturas en el alumbramiento y en la crianza de los hijos, pues la población de Kauai está formada por japoneses, filipinos, portugueses, chinos, coreanos y europeos nórdicos, además de los indígenas de ascendencia hawaiana.

Pensamos también que la poca movilidad de la población haría más fácil seguir de cerca a los sujetos en estudio y a sus familias. La esperanza de contar con una muestra estable resultó justificada. Al llegar al seguimiento de los 2 años, el 96 por ciento de los niños vivos permanecían aún en Kauai y al alcance de nuestro estudio. Conseguimos encontrar a un 90 por ciento de los niños que todavía vivían cuando tocó hacer el seguimiento de los 10 años; para los de 18 años, pudimos contar con el 80 por ciento de los participantes iniciales.

Si queríamos fomentar la cooperación de los isleños residentes necesitábamos conocerlos y, también, interesarles en nuestro estudio. Dispusimos a



1. NIÑOS DE UNA ESCUELA DE KAUAI, en los que es notoria la típica mezcla de etnias que se da entre aquellos isleños. Además de los hawaianos descendientes de polinesios, encontramos allí gentes con ascendencia japonesa, filipina, portuguesa, china, coreana y norteuropea. (Fotografía de Mike Teruya.)

tal fin de la valiosa colaboración de varios investigadores de la Universidad de California, en sus dependencias de Berkeley y de Davis, de otros de la Universidad de Hawai y de otros más de la propia isla de Kauai. Al comienzo del estudio, cinco enfermeras y un asistente social, residentes todos en Kauai, confeccionaron un censo de todas las familias de la isla, inscribieron en listas a los ocupantes de cada habitáculo y recogieron una información demográfica que incluía el historial reproductivo de todas las mujeres desde sus doce años de edad en adelante. Los entrevistadores preguntaban también a las mujeres si estaban embarazadas; a las que no lo estaban se les enviaba una tarjeta con un sobre de porte pagado y el ruego de que lo remitieran al Departamento de la Salud kauaiano tan pronto como pensasen que habían quedado en estado de buena esperanza.

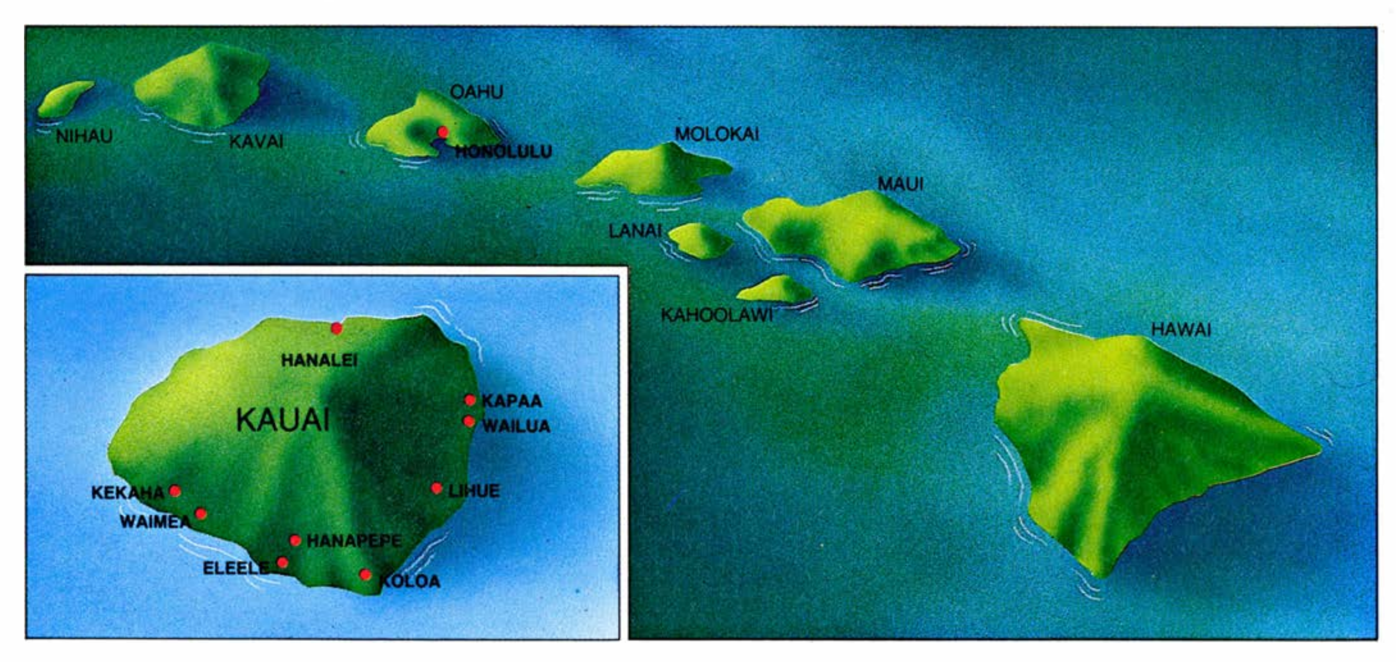
A los médicos locales se les pidió que nos hicieran llegar mensualmente una lista de las mujeres que acudieran a ellos en demanda de asistencia prenatal. Los organizadores comunitarios hablaron a las agrupaciones femeninas, a las asambleas eclesiales, a la sociedad médica municipal y a los dirigentes públicos. Las visitas de los que hacían el censo fueron apoyadas con cartas, y en las cajas de cartón en que se expendía la leche se imprimió un mensaje que exhortaba a las madres a cooperar. Pusimos anuncios en la prensa, organizamos charlas radiofónicas, dimos conferencias ilustradas con diapositivas y colgamos y repartimos carteles.

A las embarazadas adscritas a nuestro estudio las cuidadoras de la salud pública las entrevistaban una vez por trimestre durante el embarazo, tomando nota de cualquier exposición a un trauma físico o emotivo. Los médicos fueron registrando todas las complicaciones perinatales: antes del parto, en el parto mismo y en el período neonatal. Las enfermeras y los asistentes sociales se vieron con las madres en el período del puerperio y cuando los niños tuvieron la edad de un año y la de 10 años; se observó también el trato recíproco, en el hogar, de padres e hijos. Pediatras y psicólogos examinaron independientemente a los niños cuando éstos tuvieron los 2 y los 10 años de edad, evaluando su desarrollo físico, intelectual y social y anotando todos los obstáculos o problemas de conducta que advirtieron. Los maestros evaluaron los progresos escolares de los niños y su comportamiento en las aulas.

Desde el inicio del estudio fuimos recogiendo información sobre los aspectos materiales, intelectuales y emocionales del ambiente familiar, incluidos los sucesos adversos de la vida que produjeron discordias o la quiebra de la unidad familiar. Con permiso de los padres, se nos dio también acceso a todos los registros del Departamento de la Salud Pública, de los organismos educativos y de asistencia social, así como a los ficheros de la policía y a los del Tribunal Tutelar. Mis colaboradores y yo administramos también una amplia gama de tests de aptitud, de ejecución y de personalidad en los grados elementales de la escuela y en los de la enseñanza media. Por último, aunque no fuese esto lo menos importante, conocimos los puntos de vista de los mismos jóvenes entrevistándolos a la edad de 18 años y luego, otra vez, cumplidos ya los 30.

De los 698 niños que formaban el grupo de los nacidos en 1955, 69 estuvieron expuestos a moderadas dificultades perinatales, o sea, a complicaciones durante el embarazo, el parto y la lactancia. Alrededor de un 3 por ciento de este grupo —23 individuos en total— sufrieron graves tensiones prenatales o perinatales; sólo 14 de estos infantes vivieron hasta cumplir los dos años. Por cierto que 9 de los 12 niños de nuestro estudio que murieron antes de llegar a los dos años de edad habían sufrido graves complicaciones prenatales.

Algunos de los niños que sobrevivieron cayeron "víctimas" de algún tipo de desgracia en las dos siguientes décadas de su vida. Uno de cada seis niños (116 en total) padecieron disminuciones físicas o intelectuales de origen perinatal o neonatal, que les fueron diagnosticadas entre el nacimiento y los dos años de edad y que requirieron a largo plazo especiales atenciones médicas, educacionales o de custodia. Aproximadamente uno de cada cinco niños (142 en total) desarrollaron en la primera década de su existencia una problemática grave, de aprendizaje o de conducta, a



2. KAUAI, la isla Jardín, se halla al extremo noroeste del archipiélago de las Hawai. Se indican en el recuadro los pueblos que participaron en el Estudio Longitudinal sobre Kauai, cuyos resultados analiza el artículo. La capital del condado es Lihue; está situada a unas 100 millas de Honolulú, la capital de Hawai.

la que hubo que poner remedio durante más de seis meses. A los 10 años de edad, los niños que necesitaron alguna forma de servicio psicoterapéutico o de corrección educacional (de ordinario por problemas relacionados con la lectura) fueron ya el doble que los que hubieron de recibir cuidados médicos.

A la edad de 18 años, el 15 por ciento de los muchachos tenían antecedentes delictivos y el 10 por ciento sufría problemas de salud mental que requerían que se los ingresase en clínicas o, al menos, se los atendiese parahospitalariamente. Entre estos dos grupos se daba alguna imbricación. Por las fechas de sus 10 años, de todos los niños con problemas de salud mental a largo plazo 25 tenían también problemas de escaso aprovechamiento en los estudios. De los 70 niños que a los 18 años presentaban trastornos mentales, 15 estaban fichados también por haber reincidido en graves delincuencias.

Al ir siguiendo a estos niños desde su nacimiento hasta la edad de 18 años, advertimos dos cosas: que las repercusiones del esfuerzo reproductivo se aminoran con el tiempo, y que las consecuencias que para el desarrollo puedan tener virtualmente cualesquiera condiciones biológicas de peligro dependen de la calidad ambiental de la crianza. Encontramos, en efecto, que había cierta correlación entre la escala de traumas perinatales, desde los leves hasta los de mayor gravedad, y los principales deterioros físicos del sistema nervioso central y de los sistemas musculoesquelético y sensorial; el trauma perinatal estaba también en correlación con el retraso mental, con las incapacidades graves para el estudio y con problemas crónicos de salud mental tales como la esquizofrenia, que aparecía al final de la adolescencia y comienzo de la adultez juvenil.

Pero las condiciones globales de la crianza eran más poderosos determinantes de aquellos resultados que el trauma perinatal. Cuanto mejor era, de más calidad, su ambiente hogareño, más aptitudes y competencias mostraban los niños. Esto podía vérseles recién cumplidos los dos años: pequeñuelos que habían sufrido graves tensiones o traumas perinatales pero vivían en hogares de la clase media o en familias estables y bien acomodadas daban casi tan buenas puntuaciones en los tests de desarrollo de las capacidades sensoriomotoras y verbales como otros parvulillos que no habían padecido aquellos inconvenientes.

Las complicaciones prenatales y perinatales eran factores que sólo estaban en constante relación con anomalías del desarrollo físico y psicológico a las edades de los 10 y los 18 años cuando se combinaban con la pobreza crónica, las discordias familiares, la enfermedad mental de los padres u otras condiciones persistentemente malas del ambiente en que se había criado el sujeto. Los niños que fueron criados en hogares de la clase media, en un ambiente familiar estable y por una madre que había hecho todos los estudios del bachillerato, mostraban luego en sus vidas muy pocos, si algunos, efectos duraderos del esfuerzo y los traumas con que hubieron de nacer.

¿Cuántos niños pudieron contar con tan favorable ambiente? Una considerable mayoría no pudo. A 201 individuos —el 30 por ciento de los niños sobrevivientes en la población de este estudio— los designamos como niños de alto riesgo porque habían sufrido presiones, desde leves hasta graves, en el período perinatal, habían crecido en medio de pobreza crónica, habían sido criados por padres con no más de ocho grados de educación formal, o habían vivido en un ambiente familiar estropeado por la discordia, el divorcio, el alcoholismo de alguno de los padres o de los dos, o la enfermedad mental. Empleamos el término "vulnerables" para designar con él a aquellos niños que estuvieron expuestos a cuatro o más de tales factores de riesgo con anterioridad a su segundo cumpleaños.

Y dos terceras partes de estos niños (129 en total) presentaron de hecho graves problemas de aprendizaje o de conducta hacia la edad de 10 años, o tuvieron acusaciones de delincuencia, problemas de salud mental o embarazos antes de la edad de 18 años.

Sin embargo, uno de cada tres entre estos niños de alto riesgo —72 individuos en total— llegaron a ser competentes adultos jóvenes, que amaban, trabajaban y jugaban con normalidad. Ninguno de ellos presentó en la infancia ni en la adolescencia problemas graves de aprendizaje o de conducta. En la medida en que nosotros podíamos deducirlo de las entrevistas y de su historial comunitario, les iba bien en la escuela, se las arreglaban perfectamente en la vida hogareña y en la de sociedad y se proponían a sí mismos metas realistas, con expectativas sensatas en los planos educativo y vocacional cuando terminaban el bachillerato. Hacia el final de la segunda década de sus vidas, se habían convertido en gentes capaces, seguras y atentas, que manifestaban un gran afán de aprovechar cuantas oportunidades se les ofrecieran de progreso y perfeccionamiento.

Hubo niños como Michael, un chico cuyas posibilidades no parecían sobre el papel muy prometedoras. Hijo de padres adolescentes, Michael nació prematuro, pesando sólo dos kilos al nacer. Las tres primeras semanas de vida las pasó en un hospital, separado de su madre. Inmediatamente después de su nacimiento, su padre fue enviado con el ejército estadounidense al sudeste de Asia, donde permaneció dos años. Por la época en que Michael cumplió los ocho, tenía ya tres hermanos y sus padres se habían divorciado. Su madre había abandonado a la familia y nunca más tuvo contacto con sus hijos. Su padre crió a Michael y a sus hermanos con la ayuda de sus abuelos, personas de edad ya avanzada.

Otro caso fue el de Mary, nacida tras un parto que requirió 20 horas de laboriosísimos esfuerzos a una madre sobrecargada de peso y que antes de este embarazo había tenido varios abortos graves. Su padre era un obrero sin cualificar que trabajaba en una granja y sólo había ido cuatro años a la escuela. Entre los aniversarios quinto y décimo de Mary, su madre fue hospitalizada varias veces por repetidos ataques de insania mental, después de haber infligido malos tratos físicos y emocionales a la hija.

Sorprendentemente, a la edad de 18 años tanto Michael como Mary eran individuos dotados de alta estima propia y de sólidos valores, se preocupaban por los demás y eran queridos por sus iguales. Triunfaban en la escuela y tenían buenas perspectivas de futuro. Echamos una mirada retrospectiva sobre las vidas de estos dos jovencitos y de los otros 70 sujetos tan resistentes como para haber superado lo adverso de sus circunstancias y fuimos comparando sus características de comportamiento y los rasgos distintivos de su entorno con los de otros jóvenes de alto riesgo que tuvieron problemas graves y persistentes en la niñez y en la adolescencia.

Identificamos así unos cuantos factores de protección en las familias, fuera de los círculos familiares y en el interior de los mismos niños más sanos y equilibrados, factores que eran los que les habían hecho posible resistir la adversidad. Algunas causas de su logro parecían ser innatas: los niños como Mary y Michael, superadores de esas

dificultades, tienden a tener unas características temperamentales que suscitan respuestas positivas de los demás miembros de la familia y también de los extraños. Encontramos estas mismas cualidades en la edad adulta. Inclúyense entre ellas un nivel de actividad bastante alto, un grado bajo de excitabilidad y de angustia y un alto grado de sociabilidad. Ya de niños, los individuos más boyantes eran descritos por sus padres como "activos", "cariñosos", "afables", "de fácil trato", "amigos de todos" y siempre "ecuánimes". No solían comer o dormir de formas que fuesen molestas para sus cuidadores.

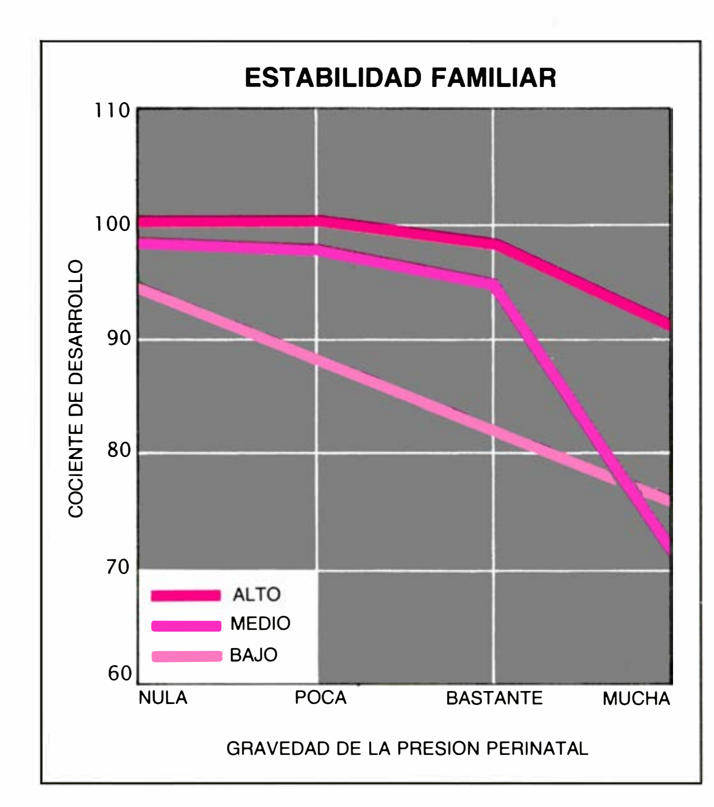
Los pediatras y psicólogos que examinaron a los niños superadores de un medio adverso notaron que, a los 20 meses de edad, eran ya muy despiertos y sensibles, decididos en el juego, proclives a buscar experiencias nuevas y prontos en pedir ayuda si la necesitaban. Cuando ingresaron en la escuela elemental, sus maestros advirtieron su capacidad de concentrarse en lo que se les enseñaba y su habilidad en la resolución de problemas y en la lectura. Aunque no eran superdotados, estos niños empleaban eficazmente todos sus talentos. Solían tener, por lo común, un entretenimiento favorito o algún interés o afición que podían compartir con un amigo. Estas actividades no estaban estrechamente determinadas por el sexo: vimos que muchachas y muchachos sobresalían por igual en recreaciones tales como la pesca, la natación, la equitación y el baile del "hula-hula", la típica danza hawaiana.

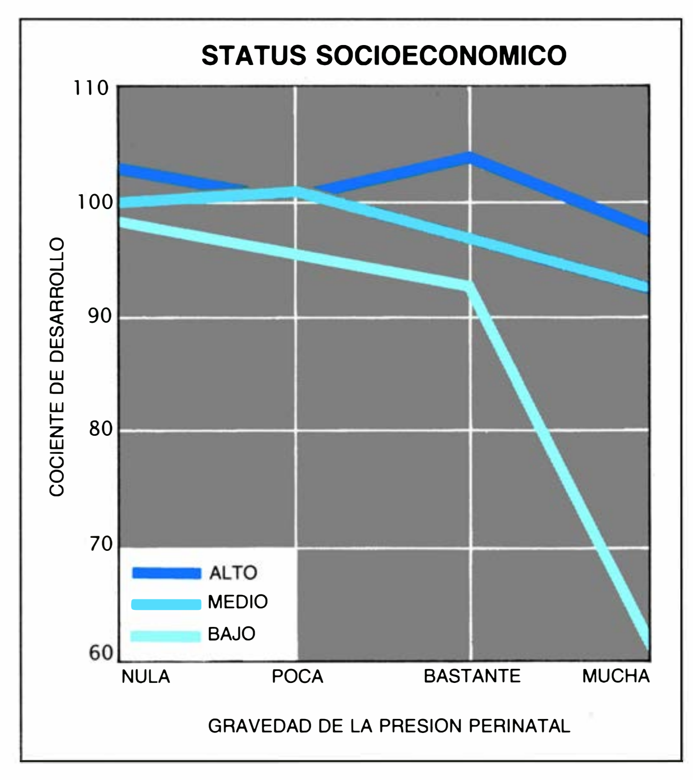
Conseguimos identificar también factores ambientales que contribuyeron a la resistencia y victoria de estos niños sobre los inconvenientes y miserias de su crianza. Los que superaron esos obstáculos solían proceder de familias en las que había a lo sumo cuatro hijos, con un intervalo de dos o más años entre el niño en cuestión y su siguiente hermano. A pesar de la pobreza, de las desavenencias familiares o de la mala salud mental de sus progenitores, estos niños tuvieron la oportunidad de establecer un fuerte vínculo con al menos una persona que les cuidaba, de la que recibieron una atención positiva durante los primeros años de vida.

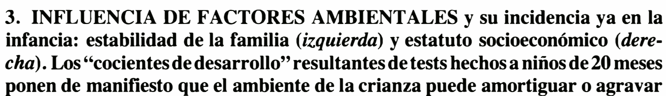
Los primeros cuidados e instrucciones podían provenir de padres sustitutivos pertenecientes al entorno familiar (abuelos, hermanos mayores, tías o tíos) o de las filas de quienes se dedican de ordinario a cuidar niños. Luego, a medida que los niños más resistentes a la adversidad iban creciendo, parecían ser muy expertos en procurarse tales padres suplentes cuando no podían contar con los biológicos (por tratarse de un progenitor ausente, o incapacitado —caso de la madre enferma mental frecuentemente hospitalizada—).

La necesidad de hacer de madre y cuidar a sus hermanos contribuyó sin duda a la notable autonomía y al sentido de responsabilidad que se advertían entre las muchachas que resistieron los infortunios, sobre todo en hogares en que el padre había muerto o se había ausentado definitivamente con abandono de la familia o por divorcio. Los muchachos resistentes eran, por otra parte, en muchos casos, hijos primogénitos que no tuvieron que compartir con los otros hermanos que les vendrían más tarde la atención de sus padres en el hogar. Hubo también en sus familias algún varón que podía servirles de modelo funcional (si no el padre, entonces algún abuelo o tío). La estructura y las reglas de la casa en que vivían y los quehaceres que se les asignaban fueron, para estos niños, parte de la rutina diaria durante la niñez y la adolescencia.

Los niños de carácter más resistente parecía ser que encontraban mucho apoyo emocional fuera de su familia inmediata. Generalmente eran bien queridos por sus compañeros escolares y tenían por lo menos un amigo íntimo, y de ordinario varios. Contaban con






3. INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES y su incidencia ya en la infancia: estabilidad de la familia (*izquierda*) y estatuto socioeconómico (*derecha*). Los "cocientes de desarrollo" resultantes de tests hechos a niños de 20 meses ponen de manifiesto que el ambiente de la crianza puede amortiguar o agravar la presión de las complicaciones perinatales. Niños que habían sufrido graves dificultades perinatales pero vivían en familias estables de clase media puntuaron tan bien o mejor que otros que no habían padecido esos inconvenientes y vivían en hogares pobres e inestables. (Esquemas realizados por Bob Conrad.)

una difusa red de vecinos, camaradas y personas mayores, a quienes pedir consejo y respaldo en tiempos de crisis y de transición. Al parecer, habían hecho de la escuela un hogar más, e inclusive un refugio al que se acogían escapando de las amarguras y trifulcas de casa. Cuando los entrevistamos a sus 18 años, muchos de estos jóvenes resistentes mencionaron a algún profesor o maestro favorito, que había llegado a ser para ellos modelo ideal de conducta, amigo y confidente, y que les prestó especial ayuda en épocas en que su propia familia era un infierno de discordias o estaba amenazada de disolución.

A otros, el apoyo emocional les vino de alguna agrupación eclesiástica, de algún joven dirigente de la YMCA (Young Men's Christian Association) o de la YWCA (Young Women's Christian Association) o de algún sacerdote. La participación en actividades paraescolares —como carreras, ligas u otras competiciones deportivas estudiantiles, banda o coro de la escuela, conjuntos de hinchas o de animadoras de los equipos—, al permitirles cooperar en empresas colectivas, fue también fuente importante de soporte emocional para los niños que superaron los peligros de malograrse.

Con la ayuda de estos factores de protección y elementos de apoyo, fueron adquiriendo conciencia del sentido de sus vidas y ganando confianza en poder controlar su destino. La experiencia de enfrentarse con eficacia y con dominio a los sobresaltos y sinsabores de la existencia de cada día les hizo adoptar una actitud esperanzada que contrastaba fuertemente con los sentimientos de desamparo e inutilidad expresados por muchos de sus compañeros.

En 1985, 12 años después de que nuestros sujetos nacidos en 1955 acabaron sus estudios de enseñanza media, nos lanzamos a indagar qué había sido de ellos. A través de los padres o de otros parientes, amigos, antiguos condiscípulos, listines telefónicos, guías callejeras, alcaldías de barrio, oficinas de información de los distritos, censos de votantes, certificaciones parroquiales de los matrimonios, registros de la propiedad, informes de la oficina de tráfico sobre matriculación de vehículos, ficheros de la policía, registros de Hacienda y documentación del Departamento Estatal de la Salud, conseguimos encontrar a 545 individuos —el 80 por ciento del grupo inicial—. La mayoría de los jóvenes, hombres y mujeres, seguían viviendo en Kauai, pero un 10 por ciento se había trasladado a otras islas y otro 10 por ciento vivía ahora en el continente; un 2 por ciento había emigrado al extranjero.

Encontramos a 62 de los 72 jóvenes a los que habíamos caracterizado como "resistentes" cuando tenían 18 años. Estos sujetos habían terminado sus estudios de bachillerato durante el período en que fue más aguda la crisis energética y se habían incorporado a la fuerza laboral durante la peor recesión que han padecido los EE.UU. desde la Gran Depresión. No obstante, estos hombres y mujeres de 30 años parecían responder bien a las exigencias de la edad adulta. Tres de cada cuatro (46 individuos) habían recibido alguna educación universitaria y estaban satisfechos con sus logros escolares. Todos, menos cuatro, trabajaban con dedicación plena, a tiempo completo, y tres de cada cuatro nos dijeron que su trabajo les gustaba.

Comparados con los compañeros de bajo riesgo del mismo grupo, una proporción significativamente elevada de individuos de alto riesgo pero "resistentes" se describieron a sí mismos como felices y satisfechos con las circunstancias de su vida diaria (un 44 por ciento contra un 10 por ciento). En cambio, los hombres y las mujeres "resistentes", que habían superado con optimismo las adversidades, informaron de un número significativamente mayor de problemas de salud que el de sus compañeros de bajo riesgo (46 por ciento contra 15 por ciento). Los problemas de los hombres parecía causarlos el excesivo esfuerzo: problemas de espalda, vértigos y desmayos pasajeros, aumento de peso y úlceras. Los problemas de salud de las mujeres estaban en gran parte relacionados con los embarazos y con el nacimiento de los hijos. Y aunque el 82 por ciento de las mujeres estaban casadas, de los hombres sólo lo estaban el 48 por ciento. Todos los individuos que se habían casado mantenían fuertes vínculos de intimidad y de colaboración con sus parejas y con la prole. Competencia personal y determinación de carácter, apoyo de un esposo o compañero y una firme fe religiosa fueron las comunes cualidades que vimos que caracterizaban a los antaño niños "resistentes" convertidos ya en adultos.

Quedamos también gratamente sorprendidos al comprobar que muchos de los niños de alto riesgo que tuvieron problemas en su adolescencia fueron capaces de recuperarse y superarlos del todo a los veinte años y al comienzo de los treinta. Conseguimos entrar en contacto con 26 (90 por ciento) de las madres adolescentes, con 56 (80 por ciento) de los sujetos que tenían problemas de salud mental y con 74 (75 por ciento) de los que, habiendo sido delincuentes, aún vivían y habían cumplido los 30 años.



4. LOS ABUELOS u otros adultos pueden ser quienes críen convenientemente y les den todo el apoyo que necesitan a los niños faltos de padres genuinos.

A casi todas las entrevistadas que en su adolescencia habían sido madres les iban mejor las cosas en el comienzo de su treintena que lo que les había ido a los 18. Un 60 por ciento (16 individuos) habían hecho más estudios que los de la escuela primaria y secundaria, y alrededor del 90 por ciento (24 individuos) tenían empleo. Tres cuartas partes de los jóvenes que delinquieron (56 individuos) se las habían arreglado para librarse del arresto al llegar a la edad adulta. Sólo una minoría de los jóvenes con trastornos (12 individuos) seguían necesitando aún los servicios de defensa de la salud mental, cumplidos ya los 30 años. Entre los momentos cruciales de la vida de estos individuos se destacaban su entrada en el servicio militar, la boda, la paternidad y la participación activa en algún grupo eclesial. De adultos, igual que de jóvenes, la mayoría de estos individuos contaban con fuentes de apoyo informales (parientes, amigos y conocidos) más que de profesionales de la salud mental y agencias de servicios sociales.

Nuestras averiguaciones parecen dar lugar a una perspectiva más esperanzadora que la que puede obtenerse leyendo la extensa literatura sobre niños "problemáticos" que llega a ocupar la atención de los terapeutas, los educadores especiales y las organizaciones de asistencia social. Los factores de riesgo y los ambientes perjudiciales no con-

ducen inevitablemente a deficiencias en la adaptación. Parece estar claro que, en cada estadio del desarrollo de un individuo desde el nacimiento hasta la madurez, se da un equilibrio variable entre sucesos violentos y adversos que incrementan la vulnerabilidad de ese individuo y factores de protección que le aumentan la resistencia.

Mientras el balance entre las adversidades de la vida y los factores de protección es favorable, resulta posible la conveniente adaptación. Cuando lo hostil y contraproducente pesa más que los factores de protección, hasta los niños mejor dotados para resistir pueden tener problemas. Quizá sea posible inclinar la balanza desde el mayor peso de la vulnerabilidad hacia el de la resistencia, procurando limitar la exposición a los factores de riesgo y el número de ocasiones de daño o intensificando la cantidad de factores de protección y de fuentes de auxilio.

De nuestra identificación de los factores de riesgo y de protección parece deducirse con claridad que algunos de los más decisivos determinantes del resultado están ya presentes cuando el niño es aún muy pequeño. Y es obvio que hay grandes diferencias individuales entre los niños de alto riesgo en cuanto a su forma de responder a las circunstancias positivas y negativas del ambiente en que se crían. El hecho mismo de que se den variaciones de unos individuos a otros entre los niños que viven en condiciones adversas sugiere que algunos de ellos necesitan mayor asistencia que otros.

Si una intervención temprana no puede hacerse extensiva a todo niño que corra riesgo, habrá que establecer unas prioridades para decidir cuáles han de recibir ayuda inmediata. Los programas de pronta intervención deben poner sus miras ante todo en aquellos infantes y parvulillos que evidentemente son los más vulnerables, por carecer —permanente o temporalmente— de vínculos sociales imprescindibles para hacer menos dura la adversidad. Tales niños pueden ser los que han sobrevivido gracias a cuidados intensivos perinatales, los hospitalizados que están separados de su familia durante largos períodos de tiempo, los bebés nacidos de padres toxicómanos o enfermos mentales y los que, cuando empiezan ya a andar, sus madres no pueden cuidarlos por tener que ir todo el día a un trabajo y no pueden tampoco pagar a quien se los cuide, los bebés de madres solteras y adolescentes, que no tienen en su casa a ninguna persona adulta, y los niños de emigrantes o de refugiados sin raíces permanentes en una comunidad.

La evaluación y la diagnosis, pasos iniciales de toda intervención temprana, se han de enfocar no sólo sobre los factores de riesgo que haya en las vidas de esos niños, sino también sobre los factores de protección. Incluyen éstos las competencias y las fuentes informales de apoyo ya existentes que puedan ser utilizadas para ampliar la comunicación y las capacidades de resolver problemas de que dé muestras el pequeñuelo, así como para aumentar su autoestimación. Nuestra investigación sobre los niños resistentes y superadores de la adversidad ha demostrado que en la vida de un niño hay otras personas —abuelos, tíos, hermanos mayores, cuidadores de día o maestros— que pueden desempeñar un papel de apoyo y defensa en los casos de incapacidad o de indisponibilidad de uno de los padres o de los dos.

En muchas situaciones sería más sensato, y también menos costoso, reforzar tales nexos informales con los parientes y con los vecinos de la comunidad que querer introducir más complicaciones burocráticas en la prestación de los servicios asistenciales.

Finalmente, para que cualquier plan de intervención resulte eficaz, el niño pequeño necesita unas atenciones educacionales lo suficientemente constantes como para que confíe en que puede contar con ellas. Los niños resistentes de nuestro estudio no fueron objeto de ningún servicio de intervención, pero tuvieron por lo menos una persona en su vida que les aceptó incondicionalmente, sin reparar en idiosincrasias temperamentales ni en deficiencias o trastornos físicos o mentales. Todos los niños pueden ser ayudados a hacerse más resistentes a las adversidades, si los adultos que hay en sus vidas dan alientos a su independencia, les enseñan a comunicarse apropiadamente y a adquirir habilidades y les proponen modelos para que se valgan por sí mismos, sin dejar a la vez de recompensar sus acciones provechosas y su conducta amable y atenta.

Gracias a los esfuerzos de muchas personas, desde los comienzos de nuestro estudio se han implantado en Kauai varios programas de actividad comunitaria y educacional orientados a atender a los niños de alto riesgo. En parte a resultas de nuestras averiguaciones, la legislatura del Estado de Hawai ha establecido que unos equipos de especialistas en los problemas de la salud mental presten servicios a los niños y adolescentes que padecen trastornos. Además, el Departamento de la Salud del Estado de Hawai ha fundado los Servicios a la Infancia, que coordinan todos los esfuerzos que se hacen para ayudar al mejor desarrollo de los niños, uniendo en este único organismo cuantas gestiones y medios se relacionan con los problemas de incapacidad, retraso mental y rehabilitación.

La evaluación de tales programas de intervención puede a su vez aclarar el proceso a seguir para crear factores de protección que ayuden a los niños vulnerables a librarse de la adversidad y la desgracia. Los historiales de los individuos resistentes estudiados por nosotros en la isla Jardín nos han convencido de que la competencia, la confianza, la buena atención y la amabilidad pueden florecer aun bajo adversas circunstancias, si los niños y los adolescentes hallan en sus vidas personas que les proporcionen una base firme para desarrollar con confianza su autonomía y sus iniciativas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

KAUAI'S CHILDREN COME OF AGE. Emmy E. Werner y Ruth S. Smith. The University of Hawaii Press, 1977.

VULNERABLE BUT INVINCIBLE: A LONGITUDINAL STUDY OF RESILIENT CHILDREN AND YOUTH. Emmy E. Werner y Ruth S. Smith. McGraw-Hill, 1982.

LONGITUDINAL STUDIES IN CHILD PSYCHOLOGY AND PSYCHIATRY: PRACTICAL LESSONS FROM RESEARCH EXPERIENCE. Dirigido por A. R. Nichol. John Wiley & Sons, Inc., 1985.

HIGH RISK CHILDREN IN YOUNG ADULTHOOD: A LONGITUDINAL STUDY FROM BIRTH TO 32 YEARS. Emmy E. Werner en *American Journal of Orthopsychiatry*, vol. 59, n.º 1, págs. 72-81, enero de 1989.

ERRATA

Número 150, marzo 1989

Pág.	*columna*	*línea*	*dice*	*debe decir*
60	2	24-25	glándulas hipofisarias	glándulas pineales
60	2	41	hipófisis	glándula pineal
60	3	2	hipófisis	glándula pineal
62	epíg. 7	2-3	glándula hipofisaria	glándula pineal

Juegos de ordenador

Un fabricador de materia que da materia de reflexión

A. K. Dewdney

"Nil posse creare de nilo."
—LUCRECIO, *De rerum natura*

Cuando recibí, hace algunos meses, una larga misiva de una persona que proclamaba haber inventado un fabricador de materia, no fue excesiva mi sorpresa. Después de todo, entre quienes me escriben sugiriendo ideas interesantes hay siempre unos pocos cuyas aseveraciones exigen de mi credulidad un verdadero esfuerzo. Mas siendo esencial para la ciencia cierta apertura de mente (por no decir su ventilación completa), me esfuerzo por no desechar tales cartas hasta haberlas leído de cabo a rabo.

Me alegro de haber procedido así en el caso de esta carta en concreto, porque el inventor fundaba su aseveración en un resultado matemático legítimo conocido como "paradoja de Banach-Tarski", así llamada en recuerdo de los dos matemáticos que la descubrieron, allá por los años veinte. Esta paradoja revela que, en ciertas circunstancias, es posible descomponer en piezas un sólido ideal, piezas que vueltas a ensamblar componen un nuevo sólido de tamaño doble que el original.

De hecho, el inventor resultó ser un matemático profesional, con muchos artículos acreditados a su nombre. Por razones que pronto serán obvias, esta persona rehúye todo tipo de publicidad, y me ha pedido que le llame Arlo Lipof. Fue la familiaridad de Lipof con la paradoja de Banach-Tarski lo que inicialmente le indujo a investigar la posibilidad de aplicar la paradoja a materia real, en lugar de a materia ideal. Su investigación ha pagado bonitos dividendos, pues Lipof ha escrito un programa de ordenador que proporciona instrucciones precisas para descomponer un cuerpo en multitud de piezas de formas tan insólitas cuan intrincadas, que, vueltas a ensamblar, recomponen un cuerpo de tamaño doble, ¡sin dejar absolutamente ningún intersticio entre ellas!

El programa de Lipof tiene profundas consecuencias, inútil es decirlo. Para explicar la paradoja y la forma en que el programa saca partido de ella, nada mejor que esta cita de la carta de Lipof:

"La paradoja es similar al conocido rompecabezas de los tangramas, que consta de varias piezas recortadas en papel o cartulina, cuyas formas son figuras geométricas sencillas. Adosando cuatro de tales piezas podemos construir un cuadrado de 64 centímetros cuadrados. No obstante, con esas mismas piezas se puede construir un rectángulo de área mayor, a saber, de 65 centímetros cuadrados, para ser exactos. Si no lo cree posible, haga la prueba, recortando las piezas como las que muestra mi dibujo [*véase la figura 1*].

"Si estos papelitos fueran en realidad piezas de oro, se podría pensar que nuestra riqueza aumentaría automáticamente al pasar de la configuración cuadrada a la rectangular. Empecemos con un cuadrado de oro, de 8 centímetros de lado y 1 de espesor, pongamos por caso. Cortémoslo después según la figura de la izquierda. Reagrupando las piezas de acuerdo con la figura de la derecha aparecerá un centímetro cúbico de oro supernumerario. Este oro pesará unos 19 gramos, cuyo valor, al precio actual, rondaría las 30.000 pesetas."

Lipof concede enseguida que, en el ejemplo anterior, la apariencia de que se obtiene algo de la nada es puramente ilusoria. Pero de inmediato asevera que, aunque la paradoja de Banach-Tarski "produce en nuestra mente el mismo efecto", sus fundamentos teóricos son impecables. La paradoja de Banach-Tarski es real, al menos en sentido matemático.

La paradoja tiene su origen en un teorema bien demostrado que, enunciado en la terminología técnica, casi resulta comprensible: "Sean A y B dos conjuntos acotados de $\mathbf{R}^3$, ambos de interior no vacío. En tal caso, A y B son equidescomponibles". El teorema puede enunciarse con menor tecnicismo si empezamos por imaginar un par de cuerpos, cuya forma y tamaño pueden ser prácticamente los que se quieran, que cumplan dos requisitos. Cada cuerpo tiene que ser "acotado", esto es, ha de poder ser encerrado en una esfera hueca adecuadamente grande, pero de tamaño definido. Y cada uno de ellos ha de tener "interior" no vacío; es decir, en algún lugar situado dentro de él hemos de poder imaginar una esfera totalmente llena del material del que sea el cuerpo.

La verdad es que ambos requisitos constituyen peticiones francamente modestas. En realidad, casi todos los objetos que pudiéramos imaginar y no las cumplieran encajarían mal con lo que solemos entender por "cuerpo". Una línea recta infinitamente larga, por ejemplo, infringe ambos criterios: no es acotada y su interior es vacío, en el sentido de que no tiene interior al que aludir. Tampoco sería lícita una imaginaria nube de puntos que se extendiera hacia el infinito en todas direcciones, que mal sería un cuerpo en el sentido habitual de la palabra.

Según el teorema, dos cualesquiera de tales cuerpos poseedores de interior no vacío son "equidescomponibles". Significa ello que podemos fragmentar uno y otro en una colección finita de piezas congruentes en sentido geométrico: cada pieza de un cuerpo resulta idéntica a una de las piezas del otro por el mero expediente de hacerla girar adecuadamente. Así, pues, al menos en teoría podemos descomponer un cuerpo en piezas, que rotularemos A_1, A_2, A_3. . .; descomponer otro cuerpo diferente en piezas y rotularlas B_1, B_2, B_3. . ., de manera que las piezas A_1 y B_1, A_2 y B_2, y así sucesivamente, sean idénticas. Tal es, en esencia, la paradoja de Banach-Tarski.

"Es posible, por tanto, tomar dos esferas macizas, doble de grande la una que la otra, y dividirlas en piezas de modo tal que éstas sean congruentes dos a dos. Dejemos de lado la esfera grande y fijémonos tan sólo en la pequeña. Imaginémosla de oro. En principio, puede descomponerse en un número finito de piezas que, vueltas a ensamblar luego, den una esfera el doble de grande."

No hay en ello trampa ninguna, pero sí es preciso darse cuenta de que a la palabra "pieza", de tan inocente aspecto, habrá que hacerle algunas precisiones topológicas. Para empezar, tales piezas no son necesariamente de formas sencillas; ni siquiera estarán constituidas por partes conexas. Algunas partes de una misma pieza pueden hallarse arbitrariamente cerca de otras, sin llegar a tocarlas del todo. Es imposible, además, medir las piezas de

ninguna manera precisa. Más todavía, ni siquiera es posible imaginar una forma de calibrar su volumen exacto. ¿Cuál sería el verdadero aspecto de tales piezas? Lipof dice que no se parecen "a nada que hayamos podido ver anteriormente. Comparadas con ellas, los fractales tienen la sencillez de las piezas del tangram".

En su forma más general, la paradoja de Banach-Tarski solamente se verifica en espacios de tres o más dimensiones. Existen, empero, teoremas emparentados de cerca con ella que ilustran la naturaleza de la paradoja en espacios de dimensiones inferiores. Tenemos un ejemplo burdo de tal fenómeno en el "espacio" unidimensional formado por todos los números enteros, dado que el subconjunto de los enteros pares representa simultáneamente tanto a la mitad como a la totalidad del conjunto. El subconjunto de los números pares constituye la mitad de los enteros, en el sentido de que uno de cada dos números enteros pertenece a él. No obstante, una transformación sencilla −la división por 2 de cada elemento del conjunto− convierte a los enteros pares en el conjunto de todos los números enteros; el conjunto y el subconjunto son del mismo tamaño.

Tal hecho no llama la atención de casi nadie, porque se da la circunstancia de que tanto el conjunto como el subconjunto son infinitos. Después de todo, la mitad de infinito sigue siendo infinita. Sería mucho más interesante hallar un espacio finito que pudiera descomponerse en piezas paradójicas, pero según la teoría ello será imposible mientras nos limitemos a espacios de una dimensión. Lo mismo vale para los espacios euclídeos de dos dimensiones, o planos "llanos". Sin embargo, sí cabe en ciertos espacios bidimensionales no euclídeos.

La explicación completa del fenómeno desborda el marco de esta sección; empero, trataré de dejar entrever su paradójica naturaleza proyectando el exótico mundo del espacio hiperbólico bidimensional sobre un disco euclídeo ordinario, como vemos en la figura 2. El espacio hiperbólico ocupa un semiplano, que vemos en la mitad superior de la ilustración. Su geometría no es euclídea, esto es, no es una geometría en la cual la distancia más corta entre dos puntos sea la línea recta. Las distancias más cortas corresponden, en cambio, a trayectorias semicirculares. En la ilustración, se ha diseccionado el espacio hiperbólico en regiones "triangulares", que se hacen más y más pequeñas conforme nos aproximamos al borde inferior del espacio. Los triángulos forman la base de una descomposición paradójica del espacio en tres piezas, coloreadas de rojo, azul y amarillo. Para los matemáticos, en este contexto una pieza puede "no ser de una pieza", por así decirlo. Puede estar compuesta por un número infinito de fragmentos, triangulares o no.

La extraña naturaleza de las tres piezas resulta obvia en grado máximo al contemplar el espacio hiperbólico a través de un ojo de buey matemático especial, esto es, proyectando el espacio sobre un disco euclídeo de dos modos diferentes. El punto marcado P en el espacio hiperbólico yace en el centro del disco de la izquierda; el punto rotulado I descansa en el centro del disco de la derecha.

En cada disco salta a la vista una sencilla simetría de rotación entre las tres piezas. Fijémonos en la pieza roja del disco de la izquierda. Si imaginamos que el disco gira 120 grados en torno a su centro, o sea, un tercio de revolución, vemos que acabaría −fragmento a fragmento− superpuesto a la pieza azul. Análogamente, otro giro de 120 grados haría coincidir la pieza roja sobre la amarilla. Dicho de otro modo, las tres piezas son congruentes; conjuntamente, las tres componen el espacio hiperbólico entero.

La naturaleza paradójica del espacio resulta evidente cuando volvemos nuestra atención al segundo disco. En esta vista del mismísimo espacio anterior, ¡la pieza roja es congruente con las otras dos piezas combinadas! Basta para verlo imaginar que hacemos girar la pieza roja 180 grados (media revolución) en torno al centro del disco. La pieza roja se superpondrá exactamente sobre las piezas azul y amarilla. Hay, por consiguiente, una pieza de espacio hiperbólico bidimensional (la pieza roja) que equivale simultáneamente a una mitad y a una tercera parte del espacio entero.

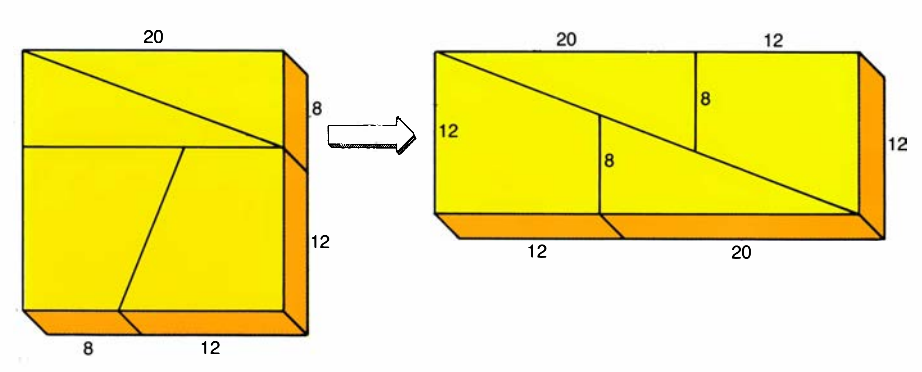
Con todo este trajín matemático, es posible que el significado de la demostración se haya perdido. "¿Por qué habría de sentirme impresionado?", se estará preguntando el lector. La razón es que los tres conjuntos representados por las piezas de color son congruencias absolutamente auténticas en el espacio hiperbólico. El hecho de que la pieza roja no muestre ser congruente, al mismo tiempo, con una mitad y una tercera parte del espacio hiperbólico sobre un mismo disco es consecuencia de las distorsiones del espacio hiperbólico asociadas con tales proyecciones.

No hay, sin embargo, necesidad de hipérbole ni de espacios hiperbólicos para demostrar la versión más general de la paradoja de Banach-Tarski. En el espacio euclídeo tridimensional (que es, aproximadamente, el mundo en que vivimos), dos cuerpos cualesquiera que verifiquen los más módicos requisitos imaginables son equidescomponibles. Para nuestra desdicha, la demostración no es constructiva; apenas si nos da alguna pista sobre cómo poner de manifiesto la equidescomponibilidad de dos bolas macizas desiguales.

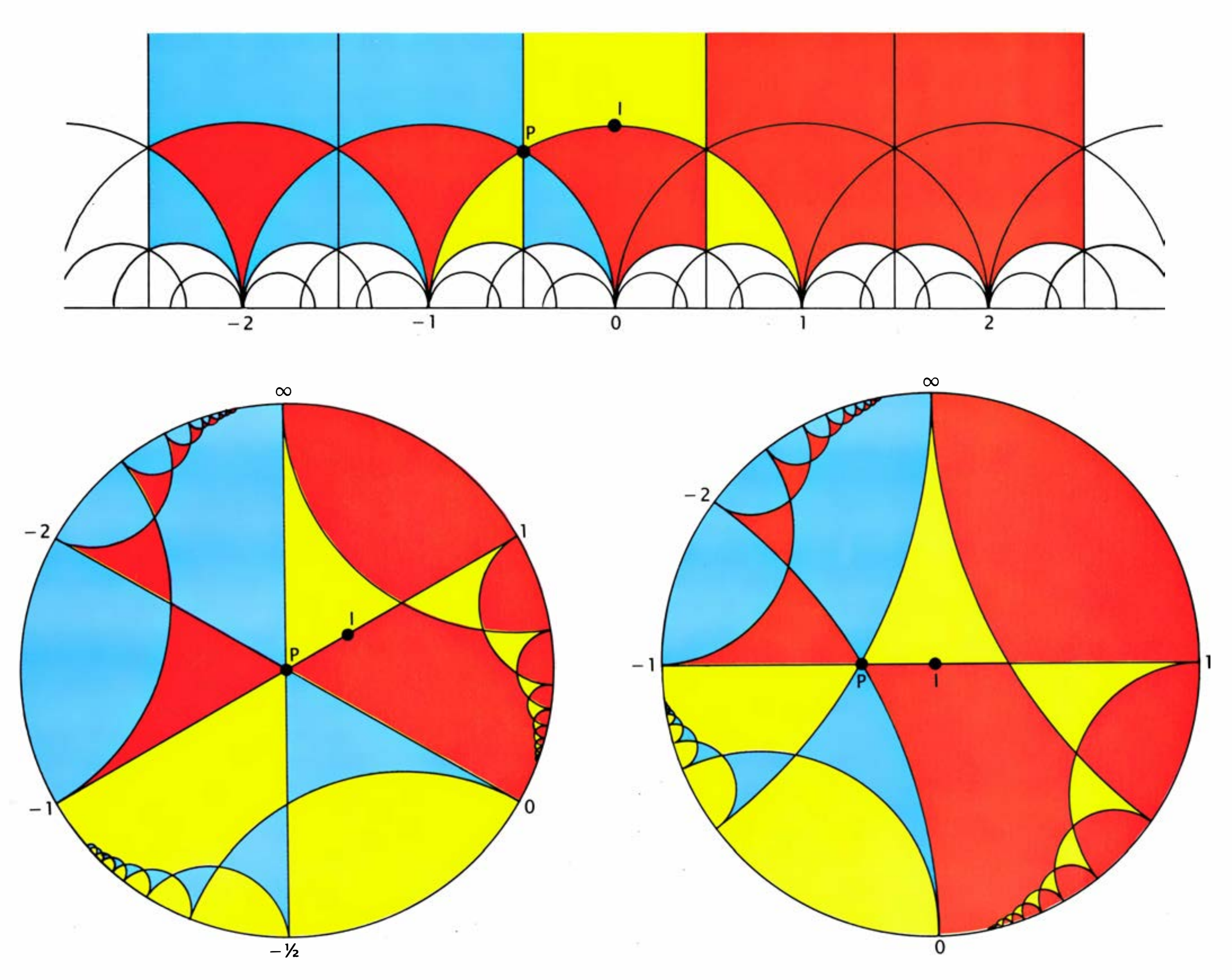
Volvamos ahora a la carta de Lipof:

"Pasé muchos años estudiando la paradoja de Banach-Tarski y los resultados afines. Lo que más me fascinaba era el carácter no constructivo de la demostración en tres dimensiones. A pesar de que los matemáticos saben que en teoría es posible descomponer una bola maciza en número finito de piezas con las cuales se puede construir después otra bola maciza de tamaño doble, nadie tenía la menor idea del aspecto que las piezas podrían mostrar, porque el corte de las piezas se basaba en un axioma de la teoría de conjuntos conocido por axioma de elección.

"El axioma de elección recibe ese nombre, no porque los matemáticos lo prefieran a otros axiomas, sino porque postula que, para toda colección de conjuntos, por grande que sea, existe una forma de elegir un elemento en cada uno de los conjuntos de la colección. La verdad es que muchos matemáticos prefieren no invocar este axio-



1. Procedimiento para obtener de la nada 1 centímetro cúbico de oro



2. Dos proyecciones del espacio hiperbólico (arriba) *sobre sendos discos* (abajo). *La pieza roja es, a un tiempo, la mitad y la tercera parte del espacio hiperbólico*

ma, porque no estipula de qué forma se efectúa, exactamente, la elección.

"Por tanto, nadie tenía la menor idea del aspecto que podrían ofrecer las piezas de la descomposición paradójica hasta que comencé a investigar la cuestión. Mecanicé la demostración de la paradoja de Banach-Tarski. La demostración especifica que la segunda bola (la mayor) puede ser ensamblada haciendo girar de dos formas las piezas de la primera bola en torno al centro de ésta, algo similar a la situación en el espacio hiperbólico. . . Estas rotaciones llevan cada una de las piezas de la primera bola a su correspondiente posición en la segunda bola. Conociendo los puntos que forman cada pieza y las rotaciones necesarias, resultó sencillo construir una rutina retrógrada, que se encargara de ir cortando en una esfera maciza las distintas piezas. Cada vez que la demostración invocaba el axioma de elección, me limité a recurrir a un generador de números aleatorios incorporado a mi ordenador personal para elegir qué puntos de la bola iban a ser elementos de cada conjunto.

"He de confesar con toda honradez que, mientras efectuaba esta investigación, no tenía la menor idea de estar encaminándome en dirección a un fabricador de materia. No estoy chiflado; sé que normalmente es preciso establecer distinción clara entre los espacios ideales de las matemáticas y los espacios en que vivimos. Pero, cuando completé mi primera simulación del teorema de Banach-Tarski, me percaté de que tenía en la mano algo así como una receta para duplicar el tamaño de cualquier sólido.

"Se me ocurrió tratar de efectuar un experimento con un material real, aunque inicialmente me abstuve. Las dimensiones de las piezas producidas por mi programa estaban todas expresadas mediante números de triple precisión, ¡una precisión que podría muy bien exigir tener que cortar átomos en dos al fabricar las piezas! Además, en aquella fase del trabajo yo mismo empezaba a dudar de estar en mi sano juicio; la idea de llevar a cabo una descomposición auténtica de una bola maciza me había dado un sentimiento de irrealidad, como si estuviera viviendo un sueño.

"No hacía más que repetirme a mí mismo que era imposible que pudiera funcionar. De nada me sirvió. Al cabo, llegué a un punto en que me resultaba imposible seguir posponiendo el experimento. Invertí una buena parte de los ahorros de mi vida en comprar 12 onzas de oro (unos 340 gramos). Hice fundir el oro en forma de bola, me compré una diminuta sierra de joyero y comencé a cortar la bola según mi receta. Un segundo programa de ordenador me resultó de la mayor utilidad en este proceso. El programa catalogaba el tamaño y forma de cada pieza. En particular, el segundo programa me decía en qué lugar de la segunda bola habría de ir cada pieza.

"El experimento entero, de principio a fin, me ocupó siete meses completos. Trabajé por las noches y los fines de se-

mana. Cuando acabé de recortar las piezas, comencé a ensamblarlas, formando con ellas una esfera de diámetro doble. Fue un trabajo delicado y exigente. Casi perdí la vista; empecé a tener dolores de cabeza. Mas perseveré. La segunda bola fue tomando forma lentamente. . ., pero no era una bola lisa. Las piezas no encajaban todo lo perfectamente que yo había esperado. Quedaban diminutos intersticios entre los fragmentos que tan penosa y cuidadosamente había ido colocando con pinzas.

"Terminé la bola algunas semanas más tarde. Le he enviado un dibujo de las principales líneas de unión de su superficie [*véase la figura 3*]. Nada revelo permitiendo a sus lectores ver el mapa, pues, comparada con la intrincada disposición interior, la superficie de la bola es un juego de niños. En cualquier caso, la bola verdadera no era tan lisa y redonda como mi dibujo puede dar a entender. Tenía prominencias e irregularidades; era francamente fea. Mas, ¡con qué emoción asía yo la bolsa de paño en que la llevaba, camino de la joyería! Tendría la prueba definitiva de mi trabajo, claro está, al fundir la bola y averiguar si realmente poseía yo unas ocho veces más de aquel oro puro y elemental con el que había emprendido mi aventura.

"Al día siguiente, el joyero me entregó una barra de oro puro que pesaba 49,58 onzas (alrededor de 1400 gramos). Era menos de lo que yo había esperado; los espacios intersticiales se habían cobrado la diferencia. Mas ya no cabía duda: se había efectuado la primera aplicación práctica de la paradoja de Banach-Tarski. Pasé días tambaleándome como un beodo, conmocionado por mi descubrimiento. En el trance en que me encuentro, ya no estoy seguro de lo que he de hacer a continuación."

Tras aquella primera carta estuve varios meses sin recibir correspondencia de Lipof. Pero un buen día del pasado noviembre, el cartero me trajo una breve misiva suya, con matasellos de un país sudamericano.

"Sin duda le alegrará saber que he logrado automatizar en cierta medida el proceso de producción de bolas grandes de oro a partir de otras más pequeñas. Con lo que me quedaba de mis ahorros he abierto un taller en la ciudad de ______________. En él, unos cuantos operarios leales ensamblan bolas de oro. Tenemos una sala de trabajo, con las paredes revestidas de ordenadores, llena de mesas donde mi gente ensambla las bolas. Ahora no tallamos las piezas, sino que las fundimos directamente y luego mis empleados las retocan. Al final del proceso siempre nos queda oro sobrante con el que volver a empezar. Producimos unos dos kilos de oro a la semana, que salen de la nada. ¿No es esto la piedra filosofal?

"Pronto llegará el momento de ir más lejos. Me parece que no volveré a escribirle; comunicarme con usted es peligroso. Ha de perdonarme, amigo mío, pero las posibilidades son tan grandes que uno se vuelve algo paranoico. Es tanto lo que he de hacer. . ."

No he vuelto a tener noticia alguna de Lipof. Pero el pasado diciembre, movido por la curiosidad, empecé a seguir día a día el precio del oro. Durante casi tres meses, ha estado cayendo lenta, pero regularmente. Tal vez sea ésta la demostración definitiva para quienes pensaban que la paradoja de Banach-Tarski era un mero juguete de matemáticos.

Como es obvio, consulté con otros matemáticos la cuestión de la paradoja. Tengo una especial deuda de gratitud con Bruno W. Augenstein, de la Corporación Rand, de Santa Mónica, California. Fue Augenstein quien sugirió utilizar el espacio hiperbólico como ejemplo de las paradójicas propiedades del espacio.

Aunque no suscribe las afirmaciones de Lipof, Augenstein sí concede que pudiera muy bien existir relación entre la paradoja de Banach-Tarski y el mundo real. Uno de los artículos de Augenstein, "Hadron Physics and Transfinite Set Theory", señala una relación entre entre la física de partículas y las descomposiciones paradójicas de objetos del espacio tridimensional. El artículo sugiere analogías "que proporcionan directamente un gran número de resultados físicos conocidos y que sugieren otros nuevos, verificables al menos en principio. La 'coloración' de los quarks y el fenómeno de su confinamiento. . . tienen explicaciones inmediatas estableciendo analogías con los teoremas de descomposición". Las palabras de Augenstein podrían interesar a los físicos (y quién sabe si a los alquimistas) que lean esta sección.

Hay en el mundo unos cuantos "bit-flipaos" por vocación propia, lectores siempre al acecho de la aparición de proyectos cuya complejidad en lo tocante a triturar números no desmerezca su talento. Los dos artículos sobre criptología aparecidos en los números de diciembre de 1988 y enero de 1989 levantaron alegres vítores entre ellos; en particular, la descripción de la

norma de codificación de datos (Data Encryption Standard, DES) proporcionó abundante grano para los molinos de los "bit-flipaos". La norma DES es un plan de codificación de mensajes informáticos que no sólo es utilizado por instituciones comerciales sino —muy posiblemente— también por diversas instalaciones militares de todo el mundo. Es largo y complicado, pero precisamenta así es como le gusta a Mike Rosing, de Darien, Illinois. Poco amigo de programación demasiado blanda, Rosing escribe sus propios programas en código ensamblador 68K, un lenguaje de bajo nivel que reside en las entrañas físicas del chip microprocesador 68000.

No hay nada como escribir y ensayar un programa (de cualquier nivel) para poner de manifiesto los deslices y errores de las especificaciones originales. La entrada correspondiente a la tabla de permutación P del módulo F estaba mal rotulada; tendrían que ser 32 bits, en lugar de los 48 señalados. También la decodificación le planteó problemas a Rosing y a los demás. Los 64 bits de la clave original no son alimentados en orden inverso; sí lo son, en cambio, las "subclaves" de 48 bits. Se suministran al bloque central partiendo de la clave 16 y concluyendo con la clave 1.

Charles Kluepfel, de Bloomfield, Nueva Jersey, se preguntó qué partes de la norma DES eran arbitrarias. Por ejemplo, ¿es forzoso que la tabla E de selección de bits haya de tener la forma que yo le di para llegar a disponer de un sistema de codificación satisfactorio? ¿Y qué decir de las tablas de sustitución? Rumores volanderos sostienen que los diseñadores de la DES dejaron deliberadamente "portillos" en ciertas partes del criptosistema que facilitan un poco la decodificación de textos DES-cifrados sin conocer la clave original.

Daniel Wolf, de Santa María, California, ha escrito en código ensamblador varios programas de interés para su ordenador Amiga, una máquina basada en el microprocesador 68000. Los poseedores de Amiga pueden solicitar copias de un criptosistema basado en la famosa máquina Enigma (que fue descrita en el número de diciembre) o en el algoritmo RSA (número de enero). Una de las grandes virtudes de los criptosistemas informáticos redactados en código ensamblador es su relampagueante velocidad. La dirección de Wolf es Box 1785, Santa María, California 93456.

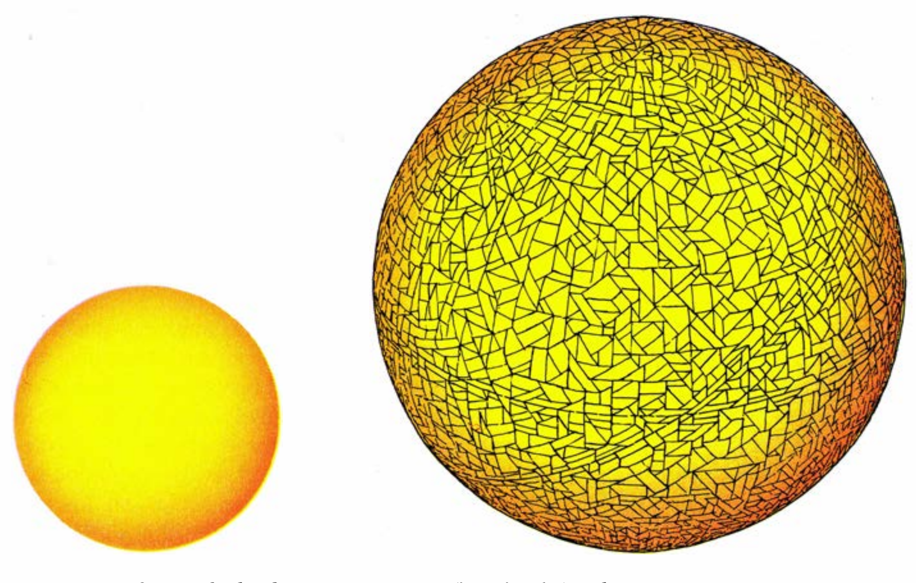
Toni Patti, de Burke, Virginia, me ha hecho saber de otra revista más de criptografía, *Cryptosystems Journal*, que Patti confecciona y publica. Los dos primeros números están consagrados a describir y distribuir los criptosistemas más perfectos actualmente disponibles para ordenadores IBM PC y compatibles. Para mayor información, los lectores interesados pueden ponerse en contacto con Patti escribiendo a 9755 Oatley Lane, Burke, Va. 22015.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TANGRAMS—330 PUZZLES. Ronald C. Read. Dover Publications, Inc., 1965.

HADRON PHYSICS AND TRANSFINITE SET THEORY. B. W. Augenstein en *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 23, n.º 12, págs. 1197-1205; diciembre de 1984.

THE BANACH-TARSKI PARADOX. Stan Wagon. Cambridge University Press, 1985.



3. La bola de oro primitiva (izquierda) *y la reconstrucción de Arlo Lipof* (derecha)

Taller y laboratorio

Construya usted mismo un acelerador de masas de Planck en su sistema solar

Antoni Akahito

Desde que los habitantes de las cavernas aprendieron a golpear dos trozos de pedernal para sacar fuego, los filósofos de la naturaleza se han visto obligados a recurrir a energías cada vez mayores en su búsqueda de los secretos más íntimos del cosmos. El supercolisionador superconductor es la última novedad entre los instrumentos proyectados por los físicos en su incesante búsqueda de la verdad, pero una vez aprobada la inversión para su emplazamiento, llegado es el momento de empezar a considerar cuál será la próxima etapa del progreso humano. Puesto que, en los años venideros, cabe esperar altibajos en las decisiones de los políticos que obstruyan el progreso científico, este mes quisiera animar a los lectores de *Taller y laboratorio* a que tomen el relevo y construyan un acelerador de Planck.

La masa de Planck, o energía de Planck (los términos son intercambiables, ya que su equivalencia queda establecida por la fórmula $E = mc^2$), es la máxima energía manejable dentro de los límites actuales de la física. Es la energía media que poseían las partículas a los 10^{-43} segundos de la gran explosión, instante hasta el cual se piensa que estaban unificadas las fuerzas gravitatoria y cuántica. Una "teoría del todo", de la cual las actuales teorías de las supercuerdas podrían ser remotas precursoras, explicaría esa unificación, susceptible de comprobarse empíricamente mediante un acelerador de Planck. En el terreno de los principios hay poca diferencia entre esta máquina y sus antecesoras: en ella se acelerarían protones o electrones hasta las energías de Planck y se les haría chocar de frente. Durante esos choques, los proyectiles convierten su energía en partículas con la masa de Planck, o sea, como las que existían en los primeros instantes de la creación. En lo esencial, un acelerador de Planck simula la gran explosión ("big bang").

Ante una máquina como ésa, los aceleradores actuales parecerían fruslerías. Pensemos en un protón. Su masa se cifra en unos 10^{-24} gramos aproximadamente, muchos órdenes de magnitud por debajo de la sensibilidad de las mejores balanzas de laboratorio. Según la expresión $E = mc^2$ alberga una energía de mil millones de electronvolt (o sea, una gigaelectronvolt, abreviado GeV). El mayor acelerador del mundo, que es el tevatrón del laboratorio Fermi, puede acelerar protones hasta energías de 2000 GeV, cifra que ya se suele abreviar 2 TeV, o sea, dos teraelectronvolt. Así, pues, el tevatrón confiere a los protones unas energías del orden de 2000 veces su masa en reposo. Si dos protones animados de esas energías chocan entre sí, pueden resultar partículas de 10^{-21} gramos, muy lejos todavía de la sensibilidad de cualquier balanza de laboratorio. El supercolisionador superconductor (SSC) está proyectado para operar con energías de 20 TeV, el décuplo de la empleada en el tevatrón.

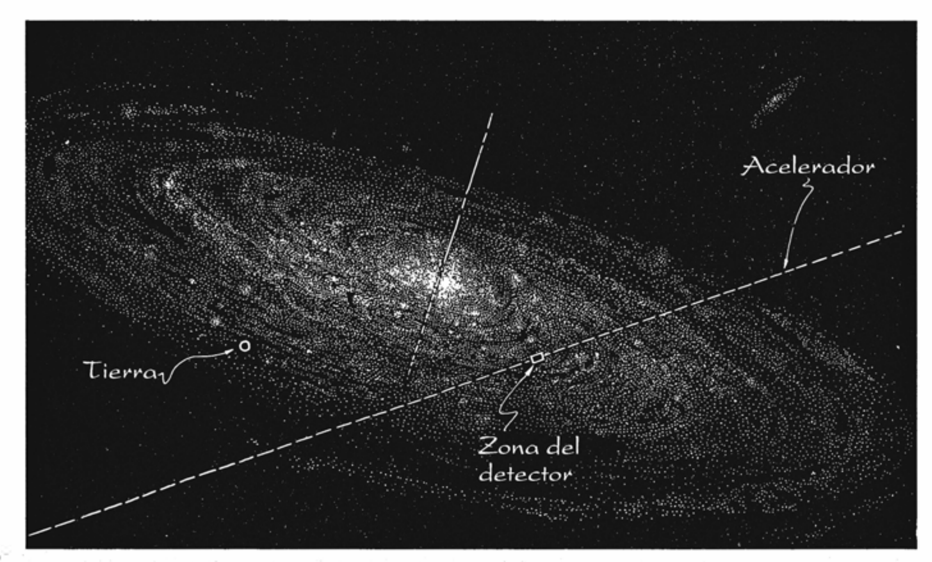
Los rayos cósmicos rinden más. En los rayos cósmicos más energéticos, como los que parece que provienen de Cygnus X-3 y otros objetos semejantes, se detectan energías del orden de 10^6 TeV. Las partículas creadas en las colisiones de rayos cósmicos tendrían unas masas del orden de 10^{-15} gramos.

Una teoría de unificación total (GUT), empero, que pretendiera combinar las fuerzas de interacción fuerte, interacción débil y electromagnética en una sola fuerza electrodébil-fuerte, comenzaría a adquirir interés a partir de unos 10^{12} TeV. Esta energía supera, en un millón de veces, la de los rayos cósmicos más energéticos y en 100.000 millones de veces la energía prevista para el SSC.

Pese a todo, sigamos buscando a Max. La energía de Planck, para la que se supone que puede entrar en juego la "teoría del todo", corresponde a 10^{16} TeV, aproximadamente. Esta energía es de 10.000 millones de veces mayor que la de los rayos cósmicos más energéticos. Y es 1000 billones superior a la de las partículas que producirá el SSC. Corresponde a una masa del orden de 10^{-5} gramos, que ya puede medirse con las actuales balanzas de laboratorio.

El primer paso y más difícil, a la hora de construir un acelerador de Planck, es encontrarle un nombre. El supercolisionador superconductor ha recargado ya la lista, cada día más larga, de novedades ungidas con el adjetivo "super": superconductores, supersimetría, superpartículas, supercomputadores y supercopas. El supercolisionador superconductor hasta se las ha arreglado para usurpar dos super, uno para cada palabra, y en las rebajas se ha hecho con una sigla de tres letras.

No es difícil descubrir la causa. El SSC tendrá un perímetro de 87 kilómetros y costará 5000 millones de dólares (suponiendo que no se sobrepasen las

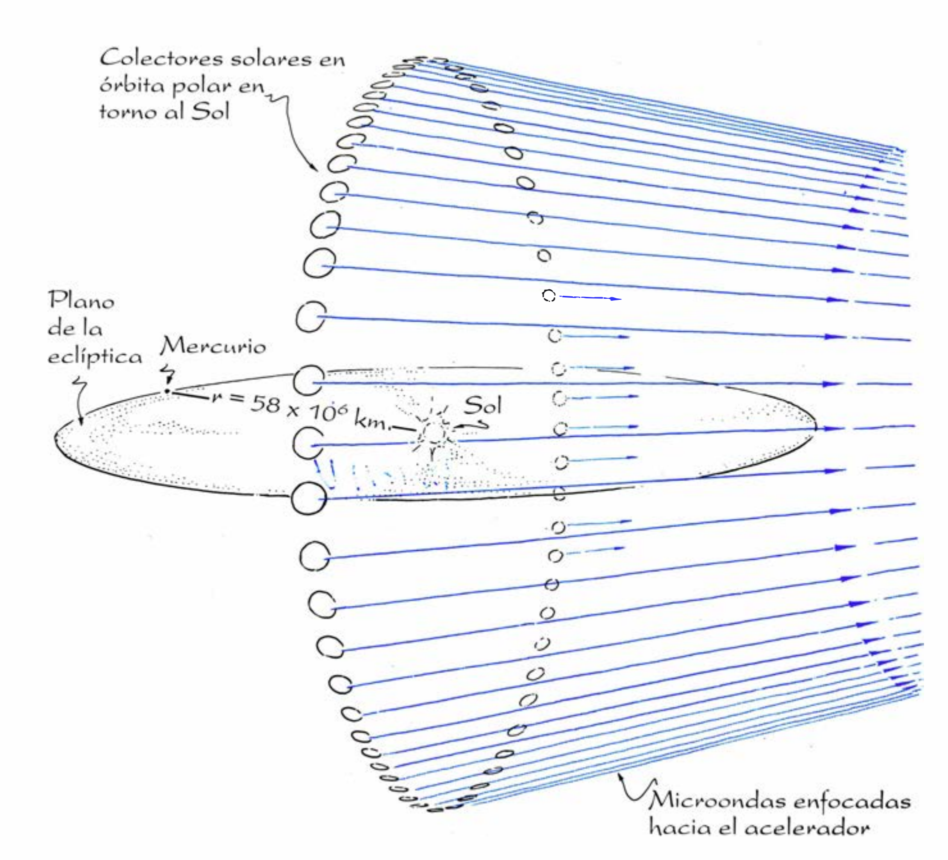


1. Acelerador lineal de Stanford aumentado en proporción a las energías de Planck

cantidades presupuestadas). Pero, aun así, no resulta del todo satisfactorio. En el contexto de los aceleradores, "super" presenta los mismos ribetes que el término "posmoderno" en la literatura. ¿Cómo denominar a lo que venga tras el posmodernismo? Si un acelerador proyectado para 20 TeV ha de ser bautizado con el adjetivo "super", en la próxima generación nos veremos obligados a recurrir a "hipercolisionador", para pasar luego a "superhipercolisionador", "hipercolosalcolisionador"... Claramente, lo super de hoy mañana será super-fluo. Ante esto, sugiero el nombre de "colisionador definitivo", o CD, para el acelerador de Planck. Por modesto que pueda parecer el utilizar sólo dos iniciales para designar una máquina de 10^{16} TeV, tendrán que bastarnos; lo hemos expresado, en virtud de lo que sabemos del espacio y el tiempo carece de sentido hablar de magnitudes mayores.

En el proyecto de un CD, el segundo paso consiste en establecer qué clase de fuente de energía necesitaremos para acelerar protones hasta la energía de Planck y crear partículas con masa de Planck. Un sencillo cálculo aritmético revela el primer obstáculo: toda la energía de una bomba atómica de un megatón convertida en planckones (llamaré así a esas partículas) produciría unos tres millones. Puede que tres millones de planckones parezcan muchísimos, pero es una cantidad insignificante comparada con las intensidades de haz alcanzadas en los aceleradores actuales. Entra en el mundo de lo normal que el tevatrón del laboratorio Fermi y otras máquinas de semejante tenor lancen contra el blanco de 10^{12} a 10^{13} partículas por segundo. Por consiguiente, para llegar a las actuales intensidades de haz, nuestros lectores necesitan una energía equivalente a la de un millón de bombas atómicas de un megatón que estallasen cada segundo.

Este cálculo se basa, evidentemente, en la hipótesis de que el 100 por ciento de la energía de cada bomba se transformase en planckones. Pura utopía. Es difícil valorar el rendimiento de los aceleradores actuales. Una intensidad de haz de 10^{13} partículas por segundo a 20 TeV representa una potencia del orden de 30 megawatt. Si tal como está proyectado se construye para el SSC una central de 300 megawatt, una intensidad de haz de 10^{13} partículas por segundo implica un rendimiento del 10 por ciento; el resto se pierde en la refrigeración de los electroimanes, líneas de transmisión, etcétera. Si la intensidad del haz fuera de sólo 10^{12} partículas



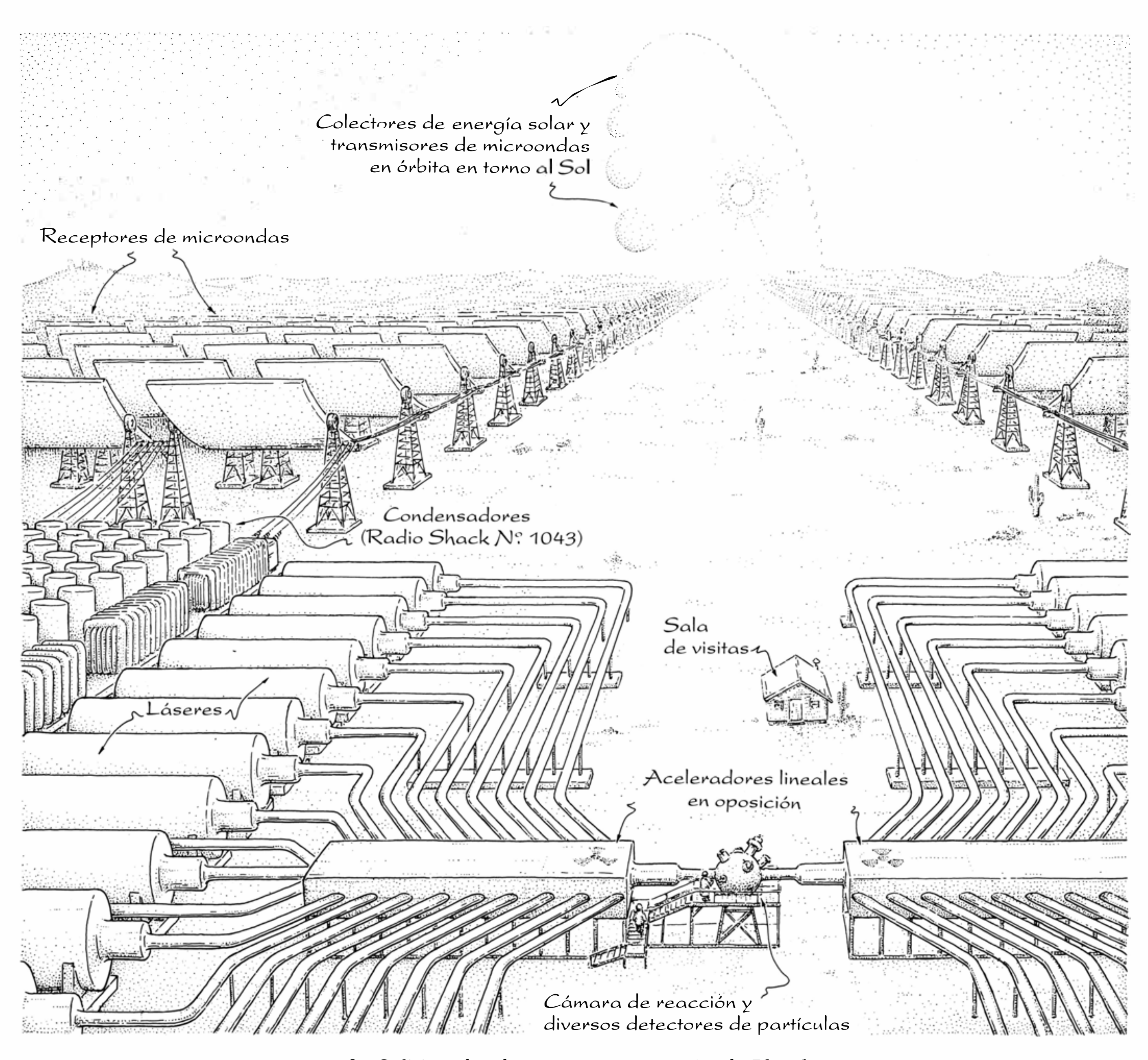
2. Los colectores solares transforman en microondas el 0,1 por ciento de la luminosidad solar

por segundo, el SSC tendría un rendimiento del 1 por ciento. Desde luego, con superconductores de temperatura ambiente (que cualquier aficionado puede prepararse en la cocina de su casa) las pérdidas por refrigeración pueden reducirse considerablemente, si no eliminarse por completo.

No obstante, vamos a concedernos un buen margen de seguridad y admitamos que nuestro CD tenga un rendimiento del 1 por ciento. Con ese resultado, la fuente de energía del CD habrá de suministrar el equivalente a 100 millones de bombas de un megatón por segundo mientras esté en funcionamiento. Pero eso supera de lejos los megatones disponibles hoy día en los arsenales.

Ahora bien, fijémonos en que esa potencia de unos 4×10^{30} erg por segundo puede obtenerse con sólo una milésima parte de la luminosidad del Sol, algo que entre de lleno en las posibilidades de una sociedad orientada por y para la ciencia. Nuestros lectores, por tanto, deberán comenzar por poner en órbita en torno al Sol un sistema de colectores solares. Si esos colectores se colocasen en una órbita cuyo radio fuera el de la seguida por Mercurio, la superficie total de captación abarcaría unos 4×10^{13} kilómetros cuadrados, o sea, unas 660 veces la superficie de Júpiter. A continuación, podremos transformar la energía solar, por ejemplo en microondas, y éstas las radiaremos hacia la Tierra. Por otra parte, recomendamos emplear una buena batería de condensadores, pues así se reducirá notablemente la superficie de captación necesaria.

Resuelto ya el problema de la fuente de energía, el siguiente paso es estudiar el diseño del acelerador en sí. Entre las máquinas modernas predominan dos tipos: los aceleradores lineales y los sincrotrones. Tal como su nombre indica, los aceleradores lineales aceleran las partículas en línea recta. El mayor de los actualmente en uso es el de Stanford, conocido bajo las siglas SLAC, que mide tres kilómetros de longitud. El modo en que un acelerador lineal impulsa y acelera las partículas, electrones pongamos por caso, es bastante sencillo. Un campo electromagnético alterno de alta frecuencia (unos 1000 megahertz) se hace pasar por una guía de microondas. La fase del campo se ajusta de forma que impulse a los electrones hacia el final de la cavidad. En otras palabras, cada electrón es acelerado dejándolo deslizar por la cresta de una onda. Los aceleradores lineales presentan el inconveniente de que sólo pueden acelerar una vez cada partícula, de comienzo a fin. Es decir, la energía



3. Colisionador de protones con energías de Planck

final de la partícula queda limitada por la cantidad de energía que el acelerador pueda comunicarle en una única pasada.

No así un sincrotrón, que acelera las partículas repetidamente a lo largo del mismo recorrido circular. Por ello, los sincrotrones tienen una capacidad energética mucho mayor que los aceleradores lineales del mismo tamaño, lo que explica que el SSC se haya proyectado en configuración de sincrotrón. Se utilizará además una técnica de uso creciente en el futuro: "colisión de haces"; queda así explicado por qué al primer "super" del SSC le sigue "colisionador". Según la relatividad, la energía disponible para crear partículas nuevas es mucho mayor cuando dos protones chocan de frente que cuando inciden contra un blanco inmóvil con respecto al laboratorio. Un colisionador de protones, por tanto, hace circular dos haces de protones en sentidos contrarios hasta que adquieren la energía necesaria, provocando entonces el choque frontal. En el SSC se pueden aprovechar totalmente los 40 TeV de los dos protones para crear partículas nuevas, con una energía de 20 TeV cada una. Para que un acelerador de haces que no colisionaran produjera una pareja de partículas de 20 TeV mediante el choque de un protón contra un blanco inmóvil en el laboratorio, habría de acelerar el protón hasta una energía de 800.000 TeV aproximadamente.

Ya sabemos por qué los sincrotrones de haces colisionantes se hallan en la cresta de la ola. Desgraciadamente para nosotros, los sincrotrones, sean de blanco inmóvil o de haces colisionantes, no pueden constituir, sin graves dificultades, la base del colisionador definitivo; por ello, recomendamos a nuestros lectores que prescindan de ellos. Veamos la razón.

Según una consecuencia, inferida ya hace un siglo, de la teoría electromagnética de Maxwell, toda partícula cargada irradia energía si se acelera. Los ingenieros de aceleradores lineales han de comenzar siempre por averiguar cuánta energía perderán los electrones al precipitarse en la cámara de vacío del SLAC, o bien cuánta energía emitirán los protones mientras circulen por los anillos de almacenamiento del SSC. Abandonados a sí mismos, esos protones seguirían circulando más o menos tiempo hasta haber irradiado toda su energía y se pararían. Ocurre así que

una fracción de la energía que consume el acelerador se gasta sin más en restituir la energía que pierden las partículas por el hecho de estar aceleradas.

La pérdida de energía en un acelerador guarda estrecha relación con su diseño. Los sincrotrones padecen una dolencia conocida precisamente como radiación sincrotrónica, que es la radiación emitida por toda partícula cargada que describe una órbita circular. En el sincrotrón de 10 GeV de la Universidad de Cornell, cada electrón recibe un estímulo de 10,5 MeV por cada vuelta, mas en cada vuelta las pérdidas por radiación sincrotrónica son del orden de 8,85 MeV. Véase, pues, que a altas energías la mayor parte de la energía no sirve para acelerar las partículas, sino para restituir las pérdidas por radiación. Para mayor desgracia, si E es la energía de una partícula y m su masa en reposo, la radiación sincrotrónica crece con el factor $(E/m)^4$, es decir, muy rápidamente. Cuando alcanzáramos tan sólo 10^4 TeV (5000 veces las energías del SSC), un electrón que circulara en un sincrotrón de 100 kilómetros de radio estaría radiando una energía equivalente a una masa de Planck en cada vuelta.

Ahora bien, las pérdidas por radiación son inversamente proporcionales al radio del acelerador. Por ello, una táctica obvia consiste en aumentar el radio de la máquina. Aunque no es tan fácil como parece, pues resulta que el radio necesario para que un electrón animado de la energía de Planck no irradie más de una energía de Planck en cada vuelta es de aproximadamente 10^{27} veces el tamaño del universo observable.

Las pérdidas por radiación sincrotrónica son proporcionales a $(E/m)^4$; el problema no es, pues, tan agudo en el caso de los protones, cuya masa es mayor que la de los electrones. Concretamente, la masa de un protón es de casi 2000 veces la del electrón; por ello, para una energía dada, las pérdidas por radiación sincrotrónica son del orden de 10^{13} veces menores. Pero el factor E^4 supone que, acelerado el protón hasta una energía 2000 veces mayor que la de un electrón, las pérdidas por radiación serán las mismas: en un acelerador de 100 kilómetros de radio, a unos 10^7 TeV las pérdidas por radiación rebasan una masa de Planck por vuelta. Para que las pérdidas por radiación que sufren los protones con energía de Planck se mantengan dentro de límites aceptables, precisaríamos un sincrotrón cuyo radio fuera de 10^{14} veces el tamaño del universo observable.

Afortunadamente para nuestros lectores, el problema tiene solución. En los aceleradores lineales, las pérdidas por radiación son muchísimo menos graves que en los sincrotrones. En un acelerador lineal, la potencia disipada en radiación siempre puede mantenerse por debajo de la potencia absorbida sin más que comunicar a los electrones una energía inferior a 10^6 TeV por centímetro. El SLAC establece un "gradiente de energía" de 10^{-7} TeV por centímetro aproximadamente, 13 órdenes de magnitud por debajo del límite superior. Los protones, al tener una masa mayor, se hallan también en este caso sujetos a un límite menos severo, que es aquí de unos 10^{13} TeV por centímetro.

Ya tenemos la solución. Como medida de prudencia, debemos construir el colisionador definitivo en configuración de acelerador lineal. En tanto mantengamos el gradiente de energía por debajo del límite de 10^6 TeV por centímetro, podremos alcanzar energías tan altas como queramos. Pero además queremos que los haces colisionen: es decir, necesitamos dos aceleradores lineales que funcionen en sentido opuesto para aprovechar toda la energía liberada en los choques frontales.

¿Sería posible aumentar el tamaño del SLAC hasta las dimensiones adecuadas para conseguir energías de Planck? Vemos, en efecto, que, con 10^{-7} TeV por centímetro, nos hace falta un acelerador de 100.000 años luz de longitud, o sea, un poco más que el tamaño de nuestra galaxia. Un colisionador tendría una longitud doble, con la zona del laboratorio posiblemente en el centro. Tan abultadas proporciones hacen que la recogida de datos resulte incómoda; un experimentador, tras pulsar el botón de puesta en marcha, tendría que esperar 200.000 años para obtener los resultados.

Pero aquí vuelven en nuestra ayuda las limitadas pérdidas por radiación de los aceleradores lineales. Si nos decidimos a construir una máquina con un gradiente de 100 TeV por centímetro, muy debajo todavía del límite de 10^6 TeV por centímetro, la longitud del CD se reduciría lo suficiente para que cupiese en la órbita de Plutón. A primera vista, un gradiente de energía de 100 TeV por centímetro, mil millones de veces el del SLAC, nos intimida por lo enorme, si no por lo inalcanzable. En Stanford, el campo acelerador lo produce una batería de más de 200 osciladores de alta frecuencia, llamados klystrons, que producen un gradiente cercano al máximo alcanzable con procedimientos convencionales. La idea

de aumentar los klystrons de 200 a 200.000 millones no parece que sea muy brillante.

Pero el klystron no es el único dispositivo capaz de generar potencias de gran magnitud. Las mayores potencias que hoy día pueden conseguirse las proporcionan los láseres. Los propios láseres comerciales de CO_2 pueden generar gradientes hasta 10 veces mayores que los del SLAC, y el láser HELIOS, del laboratorio nacional de Los Alamos, ya lo sobrepasa en un factor de 1000. Algunos comienzan a hablar de futuras máquinas accionadas por láser con gradientes de 10^{-4} TeV por centímetro, sólo un millón de veces por debajo de nuestro objetivo.

Llegados a este punto, nuestros lectores deben vencer un obstáculo grave. Los electrones están ligados a los átomos por energías del orden de 10 electronvolt. Las dimensiones atómicas giran en torno a 10^{-8} centímetros. Cabe esperar, pues, que unos gradientes superiores a 10 eV por 10^{-8} centímetros, por ejemplo, lleguen a arrancar los electrones de sus núcleos. Con nuestras unidades, ese límite superior resulta del orden de 10^{-3} TeV por centímetro, unas 100 veces más que el gradiente del SLAC. Incluso para valores más reducidos, cien mil o un millón de veces por debajo de los necesarios para el CD, no cabe duda de que la estructura y armazón del acelerador sufrirían graves daños.

Por tanto, nuestros aficionados deberán recurrir a otros medios para construir su colisionador definitivo. Un dispositivo prometedor es un acelerador de láser-plasma [véase "Aceleradores de partículas mediante plasma", por John M. Dawson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1989]. En los plasmas, que son gases fuertemente ionizados, los electrones ya están separados de sus núcleos, por lo que no pueden sufrir rupturas ulteriores. Los campos aceleradores en los aceleradores de "onda pulsátil" ya han llegado a 10^{-5} TeV por centímetro; en teoría, cabe conseguir 10^{-2} TeV por centímetro con las densidades de plasma de hidrógeno actualmente alcanzables. Esta cifra está sólo 10.000 veces por debajo de lo requerido por nuestro prototipo de CD. Acudiendo a materiales más densos, como el platino, aumentaríamos el gradiente acelerador hasta un TeV por centímetro, unas 100 veces por debajo de nuestro objetivo. El material de las estrellas de neutrones (también serviría el de una enana blanca), que es unas 10.000 veces más denso que el platino, podría proporcionar unas densidades de plasma y unos gradientes por encima de la magnitud requerida.

Las cámaras de aceleración más grandes de los aceleradores de plasma actuales tienen a lo sumo unos cuantos milímetros de longitud. Por consiguiente, para hacerse con la energía requerida, es posible que nuestros aficionados se vean obligados a instalar un grupo de máquinas "en serie".

Ante este panorama, pensemos por un momento cuán beneficioso sería para el prototipo de CD sujetar firmemente la estrella de neutrones Cygnus X-3 (que emite rayos cósmicos de 10^6 TeV) y aprovecharla como impulsor del acelerador principal (aunque en este punto no me atrevería a afirmar que la operación fuera económicamente rentable). Un rosario de láseres gigantes que se extendiera a través del sistema solar elevaría la energía de las partículas hasta la de Planck. Reconozco que sería un prototipo un tanto inmanejable y voluminoso, pero no dudemos de que los aficionados verdaderamente creativos darán con un mecanismo de aceleración más eficaz que el acelerador de plasma, y desde aquí les animamos a que no cejen en su empeño. Finalmente, por supuesto, lo que queremos es llegar al límite teórico de los 10^6 TeV por centímetro, para el cual un CD de electrones en plenas condiciones de funcionamiento tendría una longitud de sólo 10^{10} centímetros, aproximadamente un cuarto de la distancia a la Luna. Un colisionador de protones sería millones de veces más corto: resultaría un acelerador de unos diez metros.

Ya sólo queda una cuestión: la financiación. Teniendo en cuenta que en el SSC el precio por TeV previsto es de 250 millones de dólares, el CD costaría sólo $2,5 \times 10^{24}$ dólares, cifra superior al déficit presupuestario estadounidense (de hecho, algo así como unas 10^{11} veces el producto bruto mundial), lo cual no deja de ser una bagatela si consideramos lo que se puede obtener a cambio. Pese a todo, confiemos en que merced al progreso tecnológico ese precio disminuya hasta poner una gran explosión al alcance de nuestros bolsillos. En cualquier caso, no seamos tan mezquinos de colocar una etiqueta con un precio a los beneficios de índole filosófica o al cambio de perspectivas a escala mundial que tal proyecto brindaría a nuestros nietos y a los nietos de nuestros nietos, ya que con la ayuda del colisionador definitivo dispondrán de inmejorables oportunidades para saber qué pasó en el preciso momento de la creación.

Libros

Botánica española, financiación de la investigación, prehistoria europea y gen

J. Terradas, L. Alonso, D. Fletcher y Ll. Cornudella

MISCEL·LANIA. HOMENATGE AL DOCTOR PIUS FONT I QUER, dirigido por Josep M.ª Camarasa. Institut d'Estudis Ilerdencs, 1988. **HOMENAJE A PEDRO MONTSERRAT**, dirigido por Luis Villar. Instituto de Estudios Alto-aragoneses e Instituto Pirenaico de Ecología, 1988.

Una coincidencia ha reunido en el tiempo la aparición de sendos volúmenes dedicados a dos ilustres botánicos catalanes, Pius Font i Quer y Pere Montserrat i Recoder, maestro y discípulo. Al primero se le ha dedicado *Miscel·lània. Homenatge al Dr. P. Font i Quer*, una recopilación de artículos e información sobre la vida y la obra del que ha sido la primera figura incuestionable de la botánica catalana a lo largo de su historia, con motivo del centenario de su nacimiento. Al segundo, *Homenaje a Pedro Montserrat*, con motivo de la jubilación de este gran investigador de los pastos y de la flora pirenaica, producida en 1985 a sus 67 años. Font i Quer era, pues, treinta años mayor que Montserrat. Sus primeros trabajos científicos aparecieron, respectivamente, en 1910 y 1946. Font, fallecido en 1963, publicó todavía algunos el año anterior al de su muerte. Montserrat sigue en plena actividad, por fortuna, y con ese efervescente ímpetu que le caracteriza.

Pese a la generación que les separa, ambos autores pertenecen a un período que, de hecho, está ya terminando en la historia de la botánica y de la ciencia ibérica. Cambio que Font no llegó a presenciar, pero que sin duda intuyó perfectamente, como demuestra su concepción moderna de la ciencia y de las instituciones que la hacen posible. Cambio que ha llegado de la mano de la gran "explosión demográfica" del colectivo de investigadores en las universidades y en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Figuras como las de Font y Montserrat en la botánica, o Margalef en la ecología, que han dominado el panorama de estas ciencias durante muchos años de este siglo, difícilmente se podrán dar en el futuro. No sólo porque es realmente difícil que aparezcan personas de la talla humana y científica de éstas, sino sobre todo porque la futura historia de la ciencia será cada vez más la obra de equipos y escuelas en los que, sin duda, subsistirán las personalidades individuales más o menos destacadas, pero no adquirirán el carácter heroico de quienes han abierto, con un esfuerzo personal y solitario o magistral, nuevos campos al conocimiento. Ya nadie será la botánica catalana como lo fue Font, o la ecología española como Margalef. Ya no se pensará en un solo hombre, Montserrat, cuando se trate de la ecología de los pastos. Esto significa, ciertamente, un progreso, pues la capacidad para obtener información se ha multiplicado enormemente, con el incremento en equipos y en número de estudiosos. Y, sin embargo...

No, no estoy sintiendo la nostalgia de los tiempos románticos, en que hacer botánica tenía mucho de aventura, en que el trabajo de campo suponía un esfuerzo agotador usando medios de transporte tan limitados como las propias piernas, la mula o la bicicleta. Algo queda aún de eso. Mi expresión dubitativa viene de otra preocupación. En el Cafarnaúm de nuestras universidades y centros de investigación, ¿hay suficientes ideas? ¿Hay hombres capaces de conducir el progreso y de optimizar todo el esfuerzo material en marcha? ¿Se pueden encontrar mentes con la necesaria amplitud de miras y capacidad de relación, moviéndose en las fronteras de campos vecinos del conocimiento, o nos estamos sumergiendo en una investigación muy concreta y, sin duda, positiva, pero que no ataca puntos realmente cruciales?

Muchas cosas han cambiado, en efecto. El clima general de la investigación ha dejado de ser el de dedicación absoluta y lúdica dentro de una confianza sin límites en los valores superiores del conocimiento. Hoy, entre la mediocridad heredada de los primeros momentos de la expansión, la psicosis oficial del "publish or perish" y la caída de los valores "morales" en la investigación frente a la profesionalización "que no mezcla el trabajo con la vida", con todas las excepciones que se quiera, el caldo de cultivo no parece propicio para la misma clase de hombres. Los de mi generación, la que sigue a Montserrat y a Margalef, una generación algo perdida que será sin duda la de la institucionalización de la ciencia, a caballo del cambio, asistimos a él con no poco desconcierto. Pero vayamos a los libros.

La *Miscel·lània* recoge diversas impresiones personales de los discípulos y compañeros de Font, con abundancia de datos interesantes; aunque mucho de la vida de los mitos (y Font, héroe y mártir de la ciencia catalana e ibérica, lo ha sido para muchos de nosotros) se transmite oralmente, bueno es que queden estos testimonios escritos para las nuevas generaciones. El libro está cuidadosamente editado, y contiene un imponente resumen de la actividad investigadora de Font, tanto en lo que se refiere a las listas de publicaciones como en otros muy diversos aspectos. Y contiene además una denuncia reiterada contra las injusticias que hubo de sufrir aquel hombre sabio y que tan trágicamente condicionaron su obra y nuestro progreso científico. Aquella primera injusticia, menor pero reveladora y traumática, de las oposiciones que perdió frente a un rival que era, y siguió siendo, oscuro. Y aquella, monstruosa, de su depuración y encarcelamiento después de la guerra, que le alejaría de los centros de investigación.

El *Homenaje a Pedro Montserrat* es un volumen enorme. El número de comunicaciones que contiene, muchas de autores españoles, viene a ilustrar mi comentario sobre el crecimiento cuantitativo de la producción. No obstante, estos trabajos no han pasado revisión alguna para su aceptación, y ello se nota. Algunos resumen adecuadamente, en pocas páginas, considerables esfuerzos de observación (y, ¡albricias! alguno de experimentación). Otros, en cambio, quedan en un tono más retórico. El editor, L. Villar, ha debido de sufrir bastante para agrupar todo el material en bloques consistentes, que comprenden temas biogeográficos, florísticos y taxonómicos, ecológicos, fitocenológicos y fitotopográficos, pratícolas y pascícolas, anatómicos, fisiológicos y ecofisiológicos, geográficos y de ordenación del territorio, y aún queda un bloque de "varios". El criterio de aceptarlos y publicarlos todos no favorece, a mi juicio, la calidad del conjunto, que es muy heterogénea. Sin embargo, estoy seguro de que Font hu-

biese apreciado la importante presencia de técnicas relativamente innovadoras: estudios cariológicos y palinológicos, isoenzimas, análisis estadísticos multivariables y otros son de uso ya habitual entre los botánicos (cosa que se pudo apreciar también en el reciente simposio dedicado a Font en Lérida). No obstante, sorprende un poco al profano relativo que soy en estos temas que algunos autores sigan con una taxonomía puramente morfológica en casos tan difíciles como el de los *Hieracium*, o que algún otro siga teniendo una idea peregrina de la estructura de un trabajo científico.

En cualquier caso, el volumen contiene no pocos motivos de interés, y la abundancia de aportaciones, aparte del afán publicador generalizado y considerando la representatividad de los autores, es una prueba del reconocimiento y aprecio que existe en torno a la figura del homenajeado. Como no pude sumarme entonces a la fiesta, me alegra ahora tener la oportunidad de compartir en público tales sentimientos. Por su capacidad inagotable de trabajo, por su erudición, por su entusiasmo y su humanísima cordialidad, por su inquebrantable y apasionado afán de predicar los valores naturales y culturales, que tan profundamente se imbrican en los ecosistemas pastorales, Montserrat se merece éste y otros muchos homenajes. (J. T.)

ROYAL FUNDING OF THE PARISIAN ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES DURING THE 1690S, por Alice Stroup. Transactions of the American Philosophical Society; vol. 77, part. 4. Philadelphia, 1987.

La revolución científica del XVII no se limitó a un cambio de la matriz de ideas –en física, matemáticas y medicina, sobre todo–, sino que desencadenó un alud de nuevas instituciones que aseguraron su asentamiento: sociedades, observatorios, gabinetes. Sin dejar de lado la innovación técnica que, siendo su aplicación, posibilitaría en adelante un desarrollo firme y sostenido.

Por lo que a las sociedades concierne, unas nacieron por voluntad directa de sus primeros integrantes. Otras fueron establecidas por decreto real. Entre estas últimas, la Académie royale des sciences, creada, en 1666, por Jean-Baptiste Colbert, ministro de finanzas del Rey Sol. Fue su segundo "protector" François Michel Le Tellier, marqués de Louvois, y, el tercero, Louis Phélypeaux de Pontchartrain, quien se ocupó de ella desde 1691 hasta el final de la década. Creíase, a tenor de lo expuesto por Bernard de Fontenelle en su *Histoire de l'Académie royale des sciences (1666-1699)*, que Colbert se había distinguido por el impulso dado a las ciencias por sí mismas, Louvois se había entregado a las aplicaciones útiles en agricultura e industria y Pontchartrain la había dejado languidecer retirándole la asignación real. A deshacer ese tópico ha dedicado Alice Stroup dos obras. En su opinión: Colbert se preocupó también de la investigación técnica en proyectos que redundarían en beneficio de la corona y Louvois prestó atención a la historia natural (*A Company of Scientists: Botany, Patronage, and Community at the Seventeenth-Century. Parisian Royal Academy of Sciences*); y, en particular, Pontchartrain vigorizó la Academia al regularizar su fuente de financiación (el volumen que comentamos).

A Pontchartrain le tocó en suerte administrar la investigación en tiempos de crisis. Las contiendas en que se vio envuelta Francia, sus pésimas cosechas de 1693-94, la fuerte presión fiscal que ello motivó, le obligaron a imponer una economía de guerra que contrarrestaba los efectos de una inflación espectacular y de recesión económica. Su inteligencia política encontró, no obstante, los medios idóneos para resolver la situación: rejuveneció la Academia nombrando al abate Bignon para presidirla, del valor de cuyas dos primeras incorporaciones nadie dudaría hoy –Joseph Pitton de Tournefort, naturalista que ejercería un beneficioso influjo en el desarrollo de la botánica española, y Guillaume Homberg, químico de reconocido prestigio en los círculos ilustrados de su tiempo–; aumentó el número de miembros; ordenó sus fuentes de financiación; autorizó un ambicioso programa de publicaciones y se acotó el abanico de trabajos. Ante la aparente contradicción con la penuria del momento, Stroup aclara que eliminó las pensiones de la mayoría de los académicos, que debían sentirse orgullosos por pertenecer a esa institución. El dinero se reservaría a los trabajos y a los investigadores que lo necesitasen, los jóvenes y los procedentes del estrato social menos favorecido. A veces, sin embargo, las arcas estaban exhaustas, como cuando se concede el pago de un año al astrónomo Cassini, de los varios que se le debían, o se ordena a la libranza "páguese mañana, si se puede".

La estrechez no impidió el desarrollo de la investigación. En dos años, los académicos publicaron casi tantos trabajos en el *Journal des Savants* como habían escrito desde 1666. Tras una crisis de tres años (1695-1698), se inauguró la publicación anual de *Histoire et memoires*. Aunque pocas, se abrieron nuevas líneas de trabajo, como el sistema de clasificación de Tournefort, el estudio de los minerales de Morin o los textos de L'Hospital y Varignon sobre el cálculo infinitesimal. Se subvenciona el laboratorio químico y se compran instrumentos y modelos, que, al menos, mantengan una infraestructura mínima. Se estimulan las publicaciones.

Varias son las enseñanzas que este retazo de historia difícil y, a la postre, declinante, nos ofrece. Si comparamos el libro de Stroup –cuyos apéndices y tablas pintan un cuadro cabal de la investigación en ese período– con un editorial reciente de *Nature* a propósito de las universidades inglesas hoy, y lo mismo podría aplicarse a las nuestras, veremos que los problemas se mantienen vivos. En primer lugar, la autonomía de los centros. El dinero que otorga el Parlamento a instituciones públicas y privadas de investigación no debiera condicionar qué investigar y cómo. En segundo lugar, los incentivos. Han de buscarse los medios de recompensar los centros que rindan, sea en historia, en bioquímica, en cirugía, en música o en semiconductores. Y en tercer lugar, la cuantía suficiente del presupuesto a centros públicos y privados; la administración no es la dueña del dinero, aunque la discrecionalidad del reparto acabe por inducir a pensar lo contrario. Stroup recuerda que una de las razones de establecer institutos regios era asegurarse el silencio de los críticos y promover la adhesión que arropara el poder absoluto. Las subvenciones (en forma de premios, asesorías, promoción política, conferencias y mil formas caprichosas más), las sinecuras, constituían, ayer y hoy, una simonía vergonzante que muy pocos tienen la entereza de rechazar, si no la buscan. (L. A.)

LA PREHISTORIA DE EUROPA: EL NEOLÍTICO Y EL CALCOLÍTICO ENTRE EL MEDITERRÁNEO Y EL BÁLTICO. Obra dirigida por Jan Lichardus y Marion Lichardus-Itten, y la colaboración de Gerard Bailloud, Jacques Cauvin y otros, con una "addenda": *El neolítico y el calcolítico en la Península Ibérica*, por M.ª Angeles Rincón Martínez, que es, a su vez, la traductora del texto francés. Labor; Barcelona, 1987.

Iniciamos estos comentarios expresando nuestra disconformidad con el planteamiento dado a la obra por sus editores franceses, quienes excluyen en su libro, por considerarlas "zonas periféricas que desempeñan un papel secundario", a la Península Ibérica, las Islas Británicas, sur de Italia, Escan-

dinavia septentrional y Rusia central y oriental. En compensación y atendiendo a vínculos históricos, incluyen regiones de Próximo Oriente. Con ello se desvirtúa el título del libro, pues se escamotea el estudio del neolítico y calcolítico de gran parte de Europa, y en cuanto lo que a nosotros atañe, el calificativo de "periférico" y "papel secundario" atribuidos a la Península Ibérica no tiene razón de ser, como queda demostrado, precisamente, en el contenido de esta obra.

Del premeditado "olvido" en que se tiene a la Península Ibérica en gran número de libros de arqueología extranjeros, que se traducen y editan en España sin subsanar tal omisión, nos hemos venido quejando reiteradamente. Por fortuna, en esta ocasión, el editor español ha añadido un quinto capítulo en el que se estudian con toda amplitud el neolítico y calcolítico peninsulares, mereciendo nuestros plácemes por tan afortunada decisión.

Hechas estas imprescindibles observaciones, comentamos brevemente la obra que, con independencia del planteamiento que hemos criticado, es una interesante visión del neolítico y calcolítico de parte de Europa.

El libro consta de tres partes. La primera, a su vez, comprende cinco amplios capítulos; los dos primeros, redactados por J. Cauvin, están dedicados al estudio de las civilizaciones protoneolíticas, aldeanas y preurbanas de Asia Anterior, como precedente y raíz de las europeas. En el capítulo tercero, J. y M. Lichardus hablan de la difusión del neolítico y calcolítico en Europa central; al acercarse al Mediterráneo se limitan a mencionar Yugoslavia, Albania e Italia septentrional, y hacen referencia a la cerámica "cardial" sin relacionarla con la española, de tan extraordinaria riqueza. El capítulo IV está dedicado exclusivamente a Francia; lo firma G. Bailloud, quien, al estudiar la neolitización de la zona mediterránea francesa, opina que "el Languedoc aparece más abierto a temas que pueden reflejar la extensión hacia el norte de un neolítico no cardial documentado en el sur de España desde el VI milenio"; destaca que "en Aquitania y el centro de Francia han salido varios aspectos del neolítico antiguo a los que hay que buscar su relación con el resto de Francia y la Península Ibérica"; del megalitismo francés afirma que "la única región de Europa que proporciona en una fecha equivalente monumentos parcialmente comparables es Portugal", donde "la transición arquitectónica de las cistas individuales a los dólmenes de corredor parece más segura que en Francia, quedando abierta la posibilidad del origen de este tipo de construcción en el oeste de la Península Ibérica", y en cuanto al vaso campaniforme acepta "la llegada al oeste de Francia de tipos ciertamente portugueses". Como vemos, estas opiniones de Bailloud, buen conocedor de la prehistoria española, discrepan de las mantenidas por los editores franceses sobre el papel secundario de nuestra prehistoria. Como complemento a la amplia exposición de Bailloud, creemos de justicia recordar la estructuración que del neolítico francés hicieran los profesores Bosch Gimpera y Serra Ràfols en 1926, que durante muchos años ha servido de guía a la investigación francesa y que todavía, en la actualidad, tienen validez algunos de sus puntos de vista.

El capítulo V corresponde a la "addenda" de M. A. Rincón. La autora justifica la inclusión de este capítulo ya que "la península se inscribe con personalidad propia en las grandes transformaciones que afectan al pasado europeo", no habiendo duda de que en los inicios del neolítico "es en la franja costera mediterránea donde primero se cumple la transformación gradual de las actividades recolectoras-cazadoras en agrícolas-pastoriles", incluyendo por dicha razón estas zonas pioneras en el "neolítico circunmediterráneo cardial".

Advierte que, aunque ya no se admite el proceso de aculturación como dependiente directamente del Próximo Oriente, no es fácil encontrar una respuesta aceptable al mecanismo de paso de la economía cazadora-recolectora a la pastoril-agrícola. Estudia por zonas y en sus diversas etapas el neolítico, el megalitismo y el calcolítico peninsulares y sus relaciones europeas, con la cita de gran número de yacimientos, aunque, al hablar del vaso campaniforme en la región valenciana, únicamente menciona los procedentes de Villa Filomena, dado la impresión de que se trata de una zona carente de hallazgos "campaniformes", lo que no está de acuerdo con la realidad, pues se conocen unos cincuenta yacimientos con vaso campaniforme del estilo cordado, marítimo, mixto, compuesto, etc., por lo que se "desaconseja la tradicional concepción del País Valenciano como un área parca en hallazgos de este tipo", según la conclusión a que llega Bernabeu en el estudio que cita la autora. Como a ésta, también a nosotros, la limitación de espacio nos impide entrar en detalles, pero no debemos concluir sin dejar constancia de la clara exposición y gran acopio de datos que en este capítulo se recogen. Una pequeña observación: en la página 394 se sitúa la Ereta del Pedregal en el término de Beniarrés, cuando en realidad es Navarrés.

En el libro II, redactado por varios autores, se estudian los problemas y directrices actuales en la investigación prehistórica. Sus 46 páginas se distribuyen en cuatro capítulos; el primero de ellos se refiere a la producción alimentaria mediante la caza y domesticación; el segundo, a la datación por el método dendrocronológico, explicando las técnicas y las dificultades en la obtención de resultados fiables en su aplicación al campo arqueológico; el tercero destaca el gran papel desempeñado por el C-14 en la fechación de los períodos prehistóricos, reseñando los diferentes sistemas de datación por el C-14 y la corrección de fechas en años reales, haciendo hincapié en que las fechas atribuidas a diversos yacimientos neolíticos europeos por el tradicional método arqueológico coinciden con las obtenidas por el radiocarbono, pero las dudas y vacilaciones en ocasiones han hecho desconfiar de la bondad del C-14 a muchos arqueólogos. El capítulo IV está dedicado al estudio de los trazos de uso en los útiles de piedra, tema que de antiguo se ha venido tratando por los arqueólogos pero que ahora, con nuevos métodos y elementos de trabajo, alcanza resultados espectaculares, renaciendo el interés por el estudio de la traceología. Se imponen algunas observaciones, no obstante; por ejemplo: que, salvo en muy raros casos, no hay ninguna relación entre tipología y función; que la vida activa de los útiles no se limita a un solo uso; que no pueden responderse cuestiones tan generales como para qué sirven los raspadores o los buriles, etc. Pero no hay duda de que "el alcance paleontológico de estos nuevos métodos es muy amplio". En realidad, este segundo libro que acabamos de reseñar constituye por sí solo una entidad con personalidad propia, digna de tener vida independiente del resto de la obra.

En el libro III se reúne una selección de 332 yacimientos del Próximo Oriente y Europa (siete de países asiáticos y dieciocho europeos), con indicación de su emplazamiento, equipo excavador, resultados obtenidos y bibliografía; la segunda parte se dedica, precisamente, a este tema de la bibliografía, con 938 títulos. No se intercalan en ambos repertorios ni yacimientos ni autores españoles ya que éstos se relacionan al final del capítulo V del libro I, pero sí se intercalan en el índice general alfabético.

La obra es de utilidad para el lector interesado en conocer el neolítico y calcolítico de gran parte de Europa, pero también lo es, y muy especialmente, para el investigador que desee comprobar o ampliar algún dato, para lo que encontrará en este volumen abundantes elementos de consulta.

Finalmente, nuestra felicitación a los editores españoles por su decisión de añadir un capítulo referente a España, y a su autora por la acertada exposición del mismo. (D. F.)

MOLECULAR BIOLOGY OF THE GENE (volúmenes I y II), por James D. Watson, Nancy H. Hopkins, Jeffrey W. Roberts, Joan Argetsinger Steitz y Alan M. Weiner. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1987.

El "Watson" es un texto de biología molecular que, por su singularidad, está más allá de cualquier comentario. A pesar de ello, su última edición es más singular, si cabe, que sus predecesoras y fuerza a dedicarle un análisis particular. La primera edición vio la luz en 1965, tres años más tarde de que su autor, James D. Watson, recibiera el Nobel por la elucidación de la estructura helicoidal del ADN, juntamente con Sir Francis Crick y Maurice Wilkins. En aquel entonces formaba parte del claustro de la Universidad de Harvard, donde investigaba sobre los mecanismos de síntesis del ARN, además de impartir docencia sobre bioquímica en la misma universidad. El impacto que produjo la aparición de su obra fue muy notorio. Varios fueron los elementos que lo justificaron. En primer lugar, el estilo sencillo, casi coloquial, más apropiado de un género novelístico, empleado en el texto. Estilo muy alejado de la escritura sobria y densa de la mayoría de los grandes textos convencionales. Por otra, el formato inusual del volumen, que inducía a confundirlo con una edición de bolsillo, y la profusión ilustrativa con reminiscencias de "tebeo". Estas características, tanto de contenido como de maquetación, fueron respetadas íntegramente en las sucesivas reediciones del libro aparecidas con una cadencia casi quinquenal en 1970 y 1976.

Desde la tercera y última edición han transcurrido ya diez años. Durante esta larga pausa, el campo de la biología molecular se ha expandido desmesuradamente, a un ritmo de hallazgos casi diario que ha desembocado en la confirmación de muchas hipótesis, que, a su vez, han dado lugar a nuevas teorías y nuevas hipótesis. En este contexto se hace imperiosa la necesidad de textos actualizados capaces de organizar de manera coherente la avalancha continua de nueva información. En este instante preciso es cuando se produce la aparición de la 4.ª edición de *Molecular Biology of the Gene*.

Esta novísima edición presenta substanciales diferencias con respecto a sus predecesoras, que la distinguen singularmente de ellas y permiten de hecho considerarla una obra nueva. De entrada ha dejado de ser el "Watson" para convertirse en un texto de multiautoría. Concretamente son cinco los coautores: Jimmy Watson, Nancy Hopkins, Jeffrey Roberts, Joan Steitz y Alan Weiner. Un conjunto de renombrados especialistas, cada uno de ellos primerísima autoridad en su campo de especialización y a los que les han sido encomendadas partes específicas del nuevo libro. La segunda diferencia a destacar es el nuevo formato. Ya no se trata de un texto de bolsillo, sino de una obra de considerables dimensiones, muy superior a las anteriores. El formato se ha duplicado, si no triplicado, respecto del original. El texto en sí no sólo es muchísimo más extenso, como cabía esperar para recoger toda la información acumulada durante el tiempo transcurrido desde las anteriores ediciones, sino que es recogido además en dos volúmenes separados.

El primer volumen del nuevo *Molecular Biology of the Gene* ostenta el título genérico de "principios generales". Se halla dividido en ocho secciones que abarcan veintiún capítulos. Este volumen transmite un conocimiento integrado de los principios generales que controlan las estructuras y las funciones de los genes, tanto eucariotas como procariotas. Por sí solo es un texto muy apropiado para cursos de introducción y profundización de la biología molecular actual y también como libro personal de consulta.

Pese a las diferencias señaladas, debe hacerse hincapié en un elemento importantísimo, quizás el más distintivo del "Watson", que explícitamente se ha conservado en esta nueva edición. Se trata del estilo directo e incisivo de las anteriores ediciones, responsable inmediato de su excepcionalidad dentro del conjunto de textos afines. Así, el organigrama de los principios generales es idéntico a los anteriores, salvo en la nueva información añadida. Cabe recordar la exquisita sencillez de las cabeceras de capítulos: la visión mendeliana del mundo; las células obedecen las leyes de la química; los ácidos nucleicos portadores de la información genética; la pared de la célula bacteriana contemplada por un químico; las levaduras: el *Escherichia coli* de las células eucariotas; las insólitas estructuras de los genomas eucariotas. Este estilo incisivo y directo, juntamente con la profusión y simplicidad ilustrativas, determinan que el cúmulo de información contenida penetre con facilidad en la mente del lector.

El segundo volumen de esta cuarta edición del *Molecular Biology of the Gene* puede considerarse un complemento o apéndice del primero. En él se recogen, bajo el lema genérico de "aspectos especializados", un conjunto de temas que por su incidencia en la biología moderna y su influjo en la funcionalidad génica son acreedores de un tratamiento específico. Este volumen está estructurado en tres secciones: función de los genes en sistemas especializados; el cáncer en el plano genético; evolución del gen. Tres apartados que engloban siete capítulos; se analizan, entre otros temas, la biología molecular del desarrollo, la respuesta inmune, los virus eucariotas, el control de la proliferación de las células y las bases genéticas del cáncer. Cierra el texto un capítulo, que sin titubear puede considerarse como magistral, dedicado a la evolución de los genes y el origen de la vida.

En síntesis, esta última versión del *Molecular Biology of the Gene* no es una simple reedición de sus predecesoras. Sus características, brevemente analizadas en este comentario, lo convierten en una obra original de difícil comparación. Mantiene su autoridad como texto de referencia y consulta acerca de la naturaleza de los genes. Su actualización es sorprendente, ya que refleja fielmente la presente frondosidad de la biología molecular mediante una equilibrada cobertura de los sistemas eucariotas y procariotas. El apartado de ilustraciones es también descollante. Contiene alrededor de seiscientas ilustraciones entre esquemas, dibujos y micrografías, incluyendo asimismo varias páginas de imágenes en color generadas por computador. Cabe destacar por su extensión y selección los apéndices bibliográficos al final de cada capítulo.

En definitiva, la inmensa complejidad y amplitud de la investigación actual sobre los genes no sólo resulta genialmente racionalizada en *Molecular Biology of the Gene*, sino que además la obra nos adentra más allá de las fronteras actuales del conocimiento del gen, descubriéndonos una infinidad de futuras perspectivas hacia las que indudablemente nos conducirá al desarrollo biotecnológico en el que nos hallamos inmersos. (L. C.)

Apuntes

En el maremágnum de las publicaciones resulta cada vez más difícil cribar el grano de la paja. Por eso algunas universidades comienzan a defenderse de los curricula abultados de morralla. Harvard, por ejemplo, limita a 10 artículos los presentados por los candidatos a cátedra; siete será el número que aporten los optantes a una adjuntía, aunque cinco son suficientes. Si el sistema español no reforma la Ley de Reforma Universitaria, que prima la cantidad, continuaremos deplorando la mediocridad de nuestros centros superiores.

Entre los distintos útiles de que dipone la ciencia para su avance, uno de los más socorridos es el de las llamadas hipótesis de investigación. La epidemiología, en particular, se suele servir de las relaciones causa-efecto entre la exposición ante cierto agente supuestamente patógeno y el desarrollo de la enfermedad. Ahora bien, cuando ese puente no se levanta sobre métodos estadísticos rigurosos que eviten sesgos ni con las exigencias de comprobación y análisis exhaustivo propias de otras disciplinas, se cae en el riesgo de crear falsas asociaciones. Así ha ocurrido con el cáncer de mama y la reserpina, el cáncer pancreático y el consumo de café o el cáncer de mama y el alcohol.

El utillaje teórico se completa con los medios técnicos. Tal es el caso paradigmático de la astronomía. Zonas totalmente obscuras para la observación óptica abren su luz a los detectores de infrarrojos. Estrellas de poca masa o nubes de polvo interestelar o circumestelar, con temperaturas por debajo de los 1000 grados Kelvin, radian predominantemente en esa longitud de onda. Radiación que nos ha permitido conocer, por ejemplo, el centro de nuestra propia galaxia.

Si pasamos a la bioquímica, encontramos en la electroforesis en gel la herramienta que ha posibilitado nuestro progreso en el conocimiento del ADN y las proteínas. Pero no puede decirse que el mecanismo en virtud del cual las moléculas de ADN, que avanzan bajo la influencia de un campo eléctrico en un gel, se separan en razón de su longitud sea algo dominado. El modelo aceptado propone que la molécula repta por las fibras de gel con la cabeza moviéndose en la dirección del campo. Quizá sea más acertado, comienza a comprobarse, que el movimiento en cuestión proceda por ciclos de elongación y contracción, en una suerte de escalera de caracol.

Hay cepas de malaria (*Plasmodium falciparum*) que son sensibles a la acción terapéutica de la cloroquina y cepas que oponen resistencia a ese fármaco. Estas últimas, por desgracia, son las que predominan en las regiones donde el mal es endémico. Los parásitos resistentes expulsan la droga. Algo que quizá no logren con una mezcla de desipramina y cloroquina.

Largo es el camino de la terapia génica. Se ha identificado la causa que provoca el enfisema, una enfermedad congénita. Débese a una mutación en una proteína que sustituye el ácido glutámico correcto por lisina, con cambios consiguientes en el repliegue del polipéptido. Pero el tratamiento de los pacientes, a quienes se les suministra la alfa1-antitripsina necesaria, cuesta más de tres millones y medio de pesetas por individuo y año, sin que pueda certificarse que su administración prolongue la esperanza de vida de los afectados.

La Asociación Internacional de Psiquiatría ha admitido provisionalmente al grupo soviético, a la espera de la aceptación definitiva que se producirá en Atenas el próximo octubre. El obstáculo que impedía su incardinación era el uso sistemático de los métodos psiquiátricos para reprimir la disidencia política y la fe religiosa de los ciudadanos de la Unión Soviética. No todos los integrantes están, sin embargo, de acuerdo con que la causa de su exclusión haya desaparecido. Entre los reticentes se encuentran el Real Colegio de Psiquiatría de Inglaterra y la Sociedad Alemana de Psiquiatría y Neurología.

La concentración de elementos que componen los planetas y el Sol se ha inferido de los análisis de meteoritos condríticos, que serían el testimonio fiel de la nebulosa primitiva a partir de la cual se formó el sistema solar. Los análisis espectroscópicos de la corona solar y de la fotosfera indican que quizás haya que revisar las tablas aceptadas. Y así la razón de hierro a silicio y de calcio a aluminio debería multiplicarse en un tercio a lo recogido con el examen de las condritas carbonáceas. El manto de la Tierra tendría un 15 más por ciento en peso de FeO; sería, pues, más denso. Algo que encaja mejor con los datos que suministra la geofísica.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CORTINA DE LUZ AURORAL *Julio 1989*
500 PTAS.

LA AURORA DINAMICA, por Syun-Ichi Akasofu
Las brillantes cortinas de luz que cubren los cielos polares son producto de la interacción entre electrones del viento solar, su campo magnético, la magnetosfera terrestre y partículas de la atmósfera.

ESTRES VEGETAL INDUCIDO POR METALES PESADOS, por Juan Barcelo y Charlotte Poschenrieder
Las plantas, por su fisiología abierta al medio ambiente y su gran flexibilidad adaptativa, son un laboratorio excepcional de experimentación de la contaminación por metales pesados.

RANAS MARSUPIALES, por Eugenia del Pino
Estas ranas, de la bóveda de la selva tropical, han roto un lazo crucial con el agua: incuban los huevos en una bolsa especial de su dorso, en vez de depositarlos en charcas o arroyos.

FIBRAS OPTICAS EN MEDICINA, por Abraham Katzir
Haces de fibras flexibles y manejables aportan imágenes de los pulmones, vasos sanguíneos y otros muchos órganos, por escondidos que estén, sin dañar el tejido.

HENRY NORRIS RUSSELL, por David H. DeVorkin
Supo aplicar los descubrimientos de la física atómica a la astronomía y así enseñó a determinar la composición y temperatura de una estrella en razón de su espectro.

PASADO Y FUTURO DE LA AMAZONIA, por Paul A. Colinvaux
La selva de la cuenca amazónica contiene más especies que cualquier otra región del mundo. La diversidad se ha visto favorecida por los frecuentes cambios del clima de la región y por perturbaciones de su estructura física.

CREACION DE ELEMENTOS SUPERPESADOS, por Peter Armbruster y Gottfried Münzenberg
Los físicos siguen creando en el laboratorio elementos transuránidos pesados e inestables. El proceso utilizado se basa en la colisión entre dos núcleos de masa media para energías más modestas.

TOPOBIOLOGIA, por Gerarld M. Edelman
Las moléculas de la superficie celular que intervienen en los acontecimientos topobiológicos del desarrollo embrionario resultan estar emparentadas con moléculas que median la respuesta inmunológica en los vertebrados.

